



CONTROL PREDICTIVO DE POTENCIA BASADO EN FLUJO VIRTUAL PARA UN
CONVERTIDOR VSI CONECTADO A LA RED

VANESSA BRAND CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
MAYO 2019



CONTROL PREDICTIVO DE POTENCIA BASADO EN FLUJO VIRTUAL PARA UN
CONVERTIDOR VSI CONECTADO A LA RED

VANESSA BRAND CASTAÑEDA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTOR
MSc. DUBERNEY MURILLO YARCE

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
MAYO 2019

Agradecimientos

Quiero agradecer inicialmente a Dios por regalarme esta experiencia, por permitirme continuar creciendo personal y profesionalmente, agradezco a mis padres y hermanos que siempre estuvieron allí apoyándome para cumplir una más de mis metas, a todos los docentes por su paciencia y dedicación, a nuestros compañeros por su compañía en este proceso, a mi amigo y compañero Felipe Osorio Arteaga por su amistad y ayuda incondicional, a mi novio Miguel Fernando Soto por confianza y motivación en momentos críticos, a mi tutor Duberney Murillo Yarce por su contribución y entrega durante el desarrollo de este proyecto, a todos ustedes gracias totales.

Dedicación

A Dios por permitirme cumplir esta etapa de mi vida, a mis padres, a mis hermanos y mi director por su acompañamiento. Al programa de Ingeniería eléctrica por haberme brindado las herramientas necesarias para formarme como profesional, a mis compañeros y a todas las personas que fueron parte de este proceso.

Vanessa Brand Castañeda

Introducción

Para la conexión de los sistemas de energía renovable a la red eléctrica, se utiliza elementos de acople basados en electrónica de potencia. Un elemento de acople es un convertidor de potencia CC-CA denominado inversor fuente de voltaje o Voltage Source Inverter (VSI), el cual transforma la corriente y el voltaje de acuerdo con los requerimientos. Esta conexión requiere de acciones de control para hacer que las características de tensión del inversor sean iguales a las del sistema eléctrico.

Existen varios métodos para el control en inversores conectados a la red; siendo los más comunes: El control de histéresis, El control lineal, El control de Modo Deslizante (Sliding Mode Control, SMC) y El control predictivo.

El control predictivo es uno de los algoritmos más populares y más efectivos en inversores considerando su rápida respuesta, cero errores de estado estacionario, compensación del tiempo de retardo y completa compatibilidad para su implementación en sistemas digitales.

En aplicaciones de inversores conectados a la red es común aplicar control predictivo a tensión, corriente y potencia. Hoy en día, el control predictivo de potencia tiene aplicación en inversores, convertidores y accionamientos eléctricos. En este proyecto se va a controlar la potencia activa P y reactiva Q que el inversor inyecta a la red.

El aporte principal de este trabajo es estudiar el Control Predictivo basado en Flujo Virtual y compararlo con otros controladores diferentes, en un inversor VSI conectado a la red bajo condiciones de tensión balanceada, desbalanceada y con contenido armónico. Los resultados de las simulaciones validan la efectividad del controlador en los casos de estudios.

Objetivos

Objetivo general

- Implementar un control predictivo de potencia basado en flujo virtual para un convertidor VSI conectado a la red.

Objetivos específicos

- Implementar un control predictivo clásico para un inversor VSI conectado a la red utilizando Simulink de MATLAB.
- Implementar un control predictivo basado en flujo virtual en un inversor VSI conectado a la red utilizando Simulink de MATLAB.
- Realizar una comparación entre el control predictivo de potencia clásico y control predictivo basado en flujo virtual.

Tabla de contenido

Introducción	4
Objetivos	5
Capítulo 1. Conceptos Generales	9
1.1 La electrónica de potencia (EP).....	9
1.2 Dispositivos de Electrónica de Potencia.....	10
1.2.1 Dispositivos no controlados	10
1.2.2 Dispositivos semicontrolados.....	10
1.2.3 Dispositivos controlados.....	11
1.3 Conceptos EP	13
1.3.1 Convertidores.....	13
1.3.2 Estructura de un inversor VSI	14
1.3.3 Técnicas PWM.....	15
1.3.4 Transformación de Clarke.....	18
1.3.5 Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea	20
1.4 Sistema de Control.....	21
1.4.1 Los elementos básicos de un sistema de control.....	21
1.4.2 Estrategia de control	22
1.4.2.1 Control de lazo abierto (Open Loop Control)	22
1.4.2.2 Control de lazo cerrado	23
1.4.3 Sistema lineal	23
1.4.4 Sistema No lineal.....	23
1.4.5 Control Predictivo	24
Capítulo 2. Control Predictivo de Potencia Directa (PDPC)	25
2.1 Clasificación de PDPC.....	25
2.2.1 Control de Potencia basado en voltaje o Convencional (PDPC)	26
2.2.2 Control Óptimo (OPDPC)	28
2.2.3 Control de Potencia basado en Flujo Virtual como (VF-PDPC).....	28
2.2.4 Control Óptimo (OVF-PDPC).....	31
Capítulo 3. Simulación	32
3.1 Software - Matlab/Simulink	32

3.2	Entorno de trabajo de Simulink	33
3.3	Ejemplo: Circuito básico de Electrónica de Potencia en Simulink	34
3.4	Sistema de Prueba	35
3.5	Casos de Estudio	36
3.6	Algoritmos de Control.....	37
3.7	Resultados	39
3.7.1	CONVENCIONAL (PDPC).....	40
3.7.1.1	CASO 1.....	40
3.7.1.2	CASO 2.....	41
3.7.1.3	CASO 3.....	42
3.7.2	OPTIMO (OPDPC).....	43
3.7.2.1	CASO 1.....	43
3.7.2.2	CASO 2.....	44
3.7.2.3	CASO 3.....	45
3.7.3	CONVENCIONAL (VF-PDPC).....	46
3.7.3.1	CASO 1.....	46
3.7.3.2	CASO 2.....	47
3.7.3.3	CASO 3.....	48
3.7.4	OPTIMO (OVF-PDPC)	49
3.7.4.1	CASO 1.....	49
3.7.4.2	CASO 2.....	50
3.7.4.3	CASO 3.....	51
3.8	Análisis de Resultados	52
Capítulo 4. Conclusiones		54
Capítulo 6. Bibliografía		55

Título:

CONTROL PREDICTIVO DE POTENCIA BASADO EN FLUJO VIRTUAL PARA UN
CONVERTIDOR VSI CONECTADO A LA RED

Resumen

Para el desarrollo del proyecto se tuvo en cuenta cuatro fases fundamentales: Estudio y comprensión de conceptos básicos, desarrollo de algoritmos de control, implementación de algoritmos, comparación y análisis de resultados.

La primera fase de la investigación consistió en el estudio y comprensión de conceptos básicos sobre: La electrónica de potencia (dispositivos y aplicaciones), Convertidores, Sistemas de Control (Control Lazo Abierto y Lazo Cerrado), Control Predictivo (Clásico, Flujo virtual, y sus mejoras).

La siguiente fase consiste en el desarrollo de los algoritmos del Control Predictivo Clásico, Control Predictivo basado en Flujo Virtual y Control Predictivo Optimo en un inversor VSI conectado a la red.

En la tercera fase se implementaron los algoritmos de Control Predictivo Clásico, Control Predictivo basado en Flujo Virtual y Control Predictivo Optimo, en un inversor VSI conectado a la red utilizando Simulink de MATLAB. Este software es una de las herramientas de simulación más utilizadas en ingeniería eléctrica.

En la cuarta fase se compararon y analizaron los resultados de simulación obtenidos entre el Control Predictivo Clásico, Control Predictivo basado en Flujo Virtual y Control Predictivo Optimo. Para cada uno de ellos, se tuvo en cuenta las siguientes condiciones:

- Tensión Balanceada
- Tensión Desbalanceada
- Tensión Desbalanceada y con contenido armónico

Capítulo 1. Conceptos Generales

1.1 La electrónica de potencia (EP)

La electrónica de potencia es la parte de la electrónica encargada del desarrollo de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica. Aunque esta no es la única definición, en el libro *“Power Electronics Circuits, Devices and Applications”* Muhammad de H. Rashid, considera que la electrónica de potencia combina potencia, electrónica y control. El control se ocupa de las características estáticas y dinámicas de los sistemas en lazo cerrado. La potencia se encarga de los sistemas de potencia móviles y estáticos para la generación, transmisión y distribución de la potencia eléctrica. Por último, la electrónica trata con los componentes de estado sólido y circuitos para tratamiento de señales con el objetivo de obtener el control necesario. Entonces la electrónica de potencia se puede definir como aquella que se ocupa de la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la potencia eléctrica [1].

Entre las aplicaciones de la EP están:

Rectificadores:

- Control de motores, utilizados en procesos industriales.
- Transporte de energía eléctrica en CC y alta tensión.
- Cargadores de baterías.

Reguladores de alterna:

- Calentamiento por inducción.
- Control de iluminación.
- Equipos para procesos de electrodeposición.

Inversores:

- Accionadores de motores de corriente alterna en todo tipo de aplicaciones industriales.
- Calentamiento por inducción.

Troceadores:

- Alimentación y control de motores de continua.
- Tracción eléctrica: troceadores y convertidores.
- Industria: Control de motores asíncronos, Inversores, Rectificadores, etc.

Los circuitos de EP realizan una conversión de la energía eléctrica. En su operación se requiere de la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia. Los estados de conmutación son dos: Conducción y Bloqueo. Por esta razón, a los dispositivos semiconductores también se les conoce como interruptores de potencia.

- *Estado de conducción (ON)*, es cuando el interruptor se encuentra cerrado durante un periodo de tiempo. Idealmente, el dispositivo permite la circulación de corrientes altas sin caídas de tensión.
- *Estado de bloqueo (OFF)*, es cuando el interruptor se encuentra abierto durante un periodo de tiempo. En este caso, el dispositivo soporta voltajes altos pero no permite la circulación de corriente.

1.2 Dispositivos de Electrónica de Potencia

Los dispositivos semiconductores utilizados en electrónica de potencia se pueden clasificar de acuerdo a la posibilidad de control [1], en tres grupos:

- Dispositivos no controlados.
- Dispositivos semicontrolados.
- Dispositivos controlados.

1.2.1 Dispositivos no controlados

También llamados *Diodos de Potencia*, son una estructura P-N que permiten la circulación de corriente en un único sentido. No disponen de ningún terminal de control. El encendido y apagado depende exclusivamente de la polaridad del voltaje ánodo- cátodo aplicado.

1.2.2 Dispositivos semicontrolados

En este grupo se encuentran los tiristores, los SCR (Rectificador Controlado de Silicio) y los TRIACs (Triode for Alternative Current). La puesta en conducción de este conjunto de dispositivos, se debe a una señal de control externa que se aplica en uno de los terminales. Se tiene el control externo de la puesta en conducción, pero no el control del apagado del dispositivo. Esta familia se caracteriza por tener una estructura de cuatro capas semiconductoras en una secuencia P-N-P-N.

Características del SCR (Rectificador Controlado de Silicio)

- Requiere poca corriente para su activación.
- Bloquea altas tensiones y pequeñas caídas de tensión en conducción.
- No pueden operar a altas frecuencias
- Operación dependiente de la temperatura

Características de los TRIACs (Triode for Alternative Current)

- Trabaja fácilmente en AC.
- Se puede encender tanto con corriente positiva como negativa.
- Trabaja en baja tensión.
- Es un dispositivo con una capacidad de potencia muy reducida en el control.
- Trabajan a frecuencia baja, como máximo la frecuencia de la red monofásica.

1.2.3 Dispositivos controlados

En este grupo se encuentran los transistores bipolares BJT, MOSFET, IGBT y los tiristores GTO.

GTO (Gate Turn-Off Thyristor): Es un tiristor con capacidad externa de bloqueo. La puerta permite controlar las dos transiciones: paso de bloqueo a conducción y viceversa. Su característica principal es su capacidad de entrar en conducción y bloquearse a través de señales adecuadas en el terminal de puerta G. Si la corriente por la puerta es positiva, el semiconductor pasara del estado “OFF” al estado “ON”; por lo contrario, si la corriente por la puerta es negativa, el semiconductor dejara de conducir, pasando del estado “ON” a “OFF”.

Características del GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

- Desactivación rápida, permitiendo frecuencias de conmutación altas.
- Alta capacidad de voltaje de bloqueo.
- Alta relación de corriente de pico controlable a corriente promedio.

BJT (Bipolar Junction Transistor): Estructura PNP y NPN, puede trabajar en tres zonas: corte: no se inyecta corriente a la base; este se comporta como un interruptor abierto, activa: se inyecta corriente a la base y este soporta una determinada tensión entre colector y emisor, saturación: se inyecta suficiente corriente a la base para disminuir el V_{ce} y conseguir que el transistor se comporte como un interruptor cuasi ideal.

Características del BJT (Bipolar Junction Transistor)

- Reducidas pérdidas en conducción.
- Impedancia de entrada baja.
- Menos estables con la temperatura.
- Difíciles de fabricar.

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor): Es un dispositivo híbrido, reúne la facilidad de disparo de los MOSFET con las pequeñas pérdidas en conducción de los BJT, Puede soportar tensiones elevadas con un sencillo control de tensión de puerta, el accionamiento o disparo se lo realiza por tensión; este no soporta tensiones elevadas cuando es polarizado inversamente.

Características del IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

- Bajo voltaje en estado encendido.
- Son más estables que otros dispositivos.
- Menor capacidad de voltaje en estado apagado.
- Limitan la utilización en algunas aplicaciones.

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor): Son transistores controlados por tensión, ello se debe al aislamiento de la puerta respecto del resto del dispositivo.



Características del MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

- Máxima tensión drenador-fuente.
- Máxima corriente de drenador.
- Resistencia en conducción.
- Tensiones umbral y máximas de puerta.
- Velocidad de conmutación.

De los dispositivos anteriormente mencionados, El MOSFET y IGBT son ampliamente utilizados en aplicaciones de EP. En este proyecto de investigación, utilizaremos el MOSFET.

1.3 Conceptos EP

1.3.1 Convertidores

El objetivo de un convertidor de potencia es adaptar la corriente y la tensión de acuerdo a los requerimientos. Corriente y/o tensión se transforman cambiando su forma y su amplitud. Los convertidores se clasifican según la relación existente entre la señal de entrada y de salida, en los siguientes grupos:

- CA/CC: se conocen como rectificadores, y producen una salida continua a partir de una entrada alterna.
- CC/CC: se usa cuando una carga requiere una corriente o una tensión continua específica (normalmente regulada), pero el generador tiene un valor de continua diferente o no regulado.
- CA/CA: se utilizan para cambiar la amplitud y/o la frecuencia de una señal alterna.
- CC/CA: se denomina como inversor. En el inversor, la potencia media fluye desde el lado de corriente continua hacia el lado de corriente alterna.

Existen dos tipos de inversores; fuente de corriente y fuente de tensión. Generalmente el inversor fuente de tensión es el más utilizado como elemento de acople entre las fuentes de energías renovables y la red del sistema eléctrico de potencia.

Para hacer la conexión de un convertidor CC-CA (inversor), se requiere condiciones como la correcta sincronización entre la tensión que tenga la red y la tensión de salida del convertidor, debido a que deben tener igual magnitud, frecuencia y ángulo de fase. Esta conexión requiere de acciones de control para hacer que las características de tensión del convertidor sean llevadas hasta igualar las del sistema.

1.3.2 Estructura de un inversor VSI

El inversor VSI está compuesto por un condensador, un conjunto de dispositivos semiconductores y un filtro. El condensador es el elemento almacenador de energía. Los semiconductores son los elementos que mediante su conmutación sintetizan las señales de referencia que son inyectadas a la red en el punto de conexión. El filtro atenúa el efecto armónico consecuencia de la conmutación del convertidor. Fig. 1 muestra el inversor VSI de tres ramas y sus componentes, en una conexión a red [2].

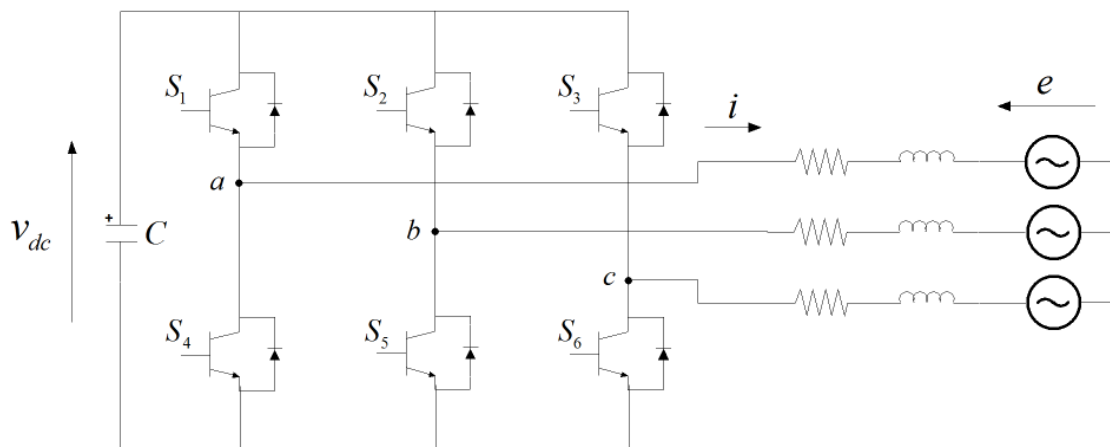


Fig. 1. Convertidor VSI de tres ramas conectado a red, Fuente: Análisis comparativo del Control Predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables, Autores: Duberney Murillo-Yarce, Alfonso Álzate-Gómez, Andrés Escobar-Mejía.

1.3.3 Técnicas PWM

Las técnicas PWM se pueden clasificar en dos grupos principales: modulación basada en portadora y modulación vectorial. La modulación basada en portadora es simple, presenta bajo tiempo computacional y fácil implementación [3]. La modulación vectorial presenta mejor desempeño: menor contenido armónico, secuencias de conmutación óptimas y mayores voltajes [4]. En esta técnica se obtiene un mayor aprovechamiento del voltaje del bus DC, como se demostró en [5]. En la modulación basada en portadora las señales de conmutación por fase son independientes, mientras en la modulación vectorial las señales de las tres fases están integradas en el mismo algoritmo [6].

La técnica más utilizada en la modulación basada en portadora es la modulación sinusoidal PWM (SPWM). En esta técnica la señal de referencia de naturaleza sinusoidal es comparada con una señal triangular de alta frecuencia. Así, las señales PWM obtenidas para cada rama guardan en forma implícita la frecuencia y la forma de la señal de referencia. En la modulación vectorial PWM (SVPWM), se obtiene una secuencia de conmutación asociada a vectores adyacentes según la posición del fasor del voltaje de referencia. Dependiendo de la simetría de las señales y del cambio de estado de los dispositivos, esta modulación puede ser continua o discontinua.

En la modulación SPWM la señal sinusoidal de frecuencia constante (moduladora) se compara con una señal triangular de mayor frecuencia (portadora), para definir las señales de conmutación de dispositivos de la misma rama que generan la señal de referencia de una fase. Para obtener las referencias de las otras dos fases, se repite el proceso considerando señales de la misma amplitud y desfasadas 120 grados. Una relación importante es el índice de modulación que relaciona la amplitud de la moduladora y la portadora.

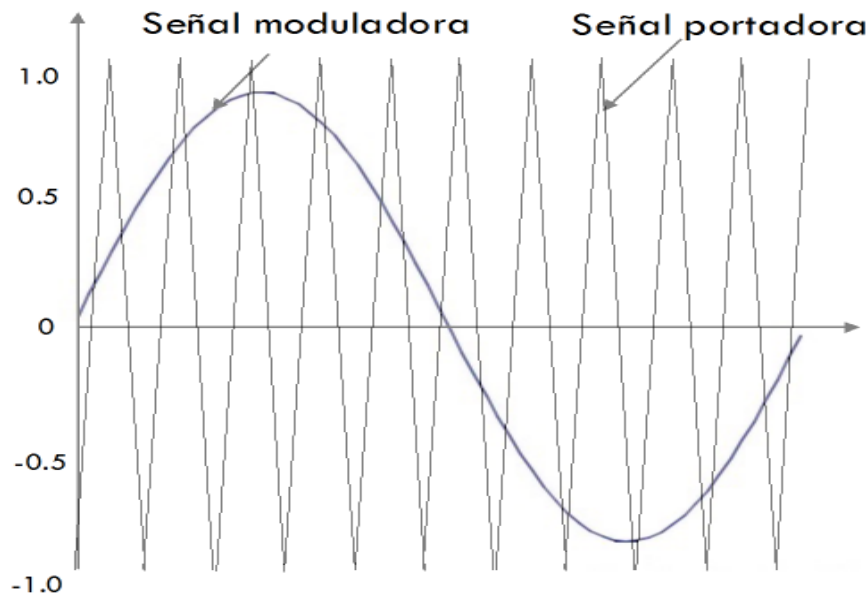


Fig. 2. Modulación SPWM monofásica. Fuente: Análisis comparativo del Control Predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables, Autores: Duberney Murillo-Yarce, Alfonso Álzate-Gómez, Andrés Escobar-Mejía.

La modulación SVPWM, se basa en los vectores de conmutación que son los posibles estados de los dispositivos del puente inversor. El vector está formado por tres dígitos binarios, uno asociado a cada rama. Por ejemplo, el vector (110) implica que el dispositivo superior de la primera rama está activado (S1 ON), lo mismo que el dispositivo superior de la segunda rama (S2 ON), mientras que el dispositivo superior de la tercera rama está desactivado (S3 OFF). El estado de los dispositivos inferiores es contrario al del dispositivo superior, para evitar cortocircuitar el elemento almacenador de energía. Con los posibles estados de conmutación se obtiene el espacio vectorial definido en el plano complejo $\alpha\beta$ donde se ubica el vector voltaje de referencia. En Fig. 3 se observa el espacio vectorial y en la Tabla 1, la correspondencia de los vectores de conmutación en coordenadas $\alpha\beta$.

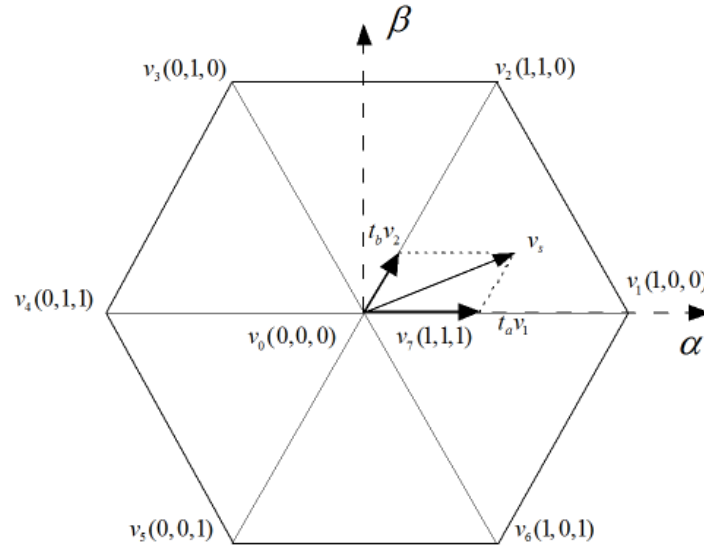


Fig. 3. Modulación SVPWM (sextantes). Fuente: Análisis comparativo del Control Predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables, Autores: Duberney Murillo-Yarce, Alfonso Álzate-Gómez, Andrés Escobar-Mejía.

v	S_1	S_2	S_3	$v_{\alpha\beta}$
v_0	0	0	0	0
v_1	1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$
v_2	1	1	0	$\left(\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}\right)V_{dc}$
v_3	0	1	0	$\left(-\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}\right)V_{dc}$
v_4	1	0	0	$-\frac{2}{3}V_{dc}$
v_5	0	0	1	$\left(-\frac{1}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3}\right)V_{dc}$
v_6	1	0	1	$\left(\frac{1}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3}\right)V_{dc}$
v_7	1	1	1	0

Tabla 1. Vectores de conmutación en coordenadas $\alpha\beta$. Fuente: Análisis comparativo del Control Predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables, Autores: Duberney Murillo-Yarce, Alfonso Álzate-Gómez, Andrés Escobar-Mejía.

1.3.4 Transformación de Clarke

Esta transformación permite transformar los valores instantáneos de las tensiones y corrientes de las fases abc de un sistema trifásico en un sistema de ejes ortogonales $\alpha\beta 0$, como se muestra en la Fig. 5. el eje- α coincide con el eje de la fase a, y el eje- β está atrasado 90° , para que esta transformación sea bidireccional, una tercera variable conocida como componente de secuencia-cero se adiciona [8].

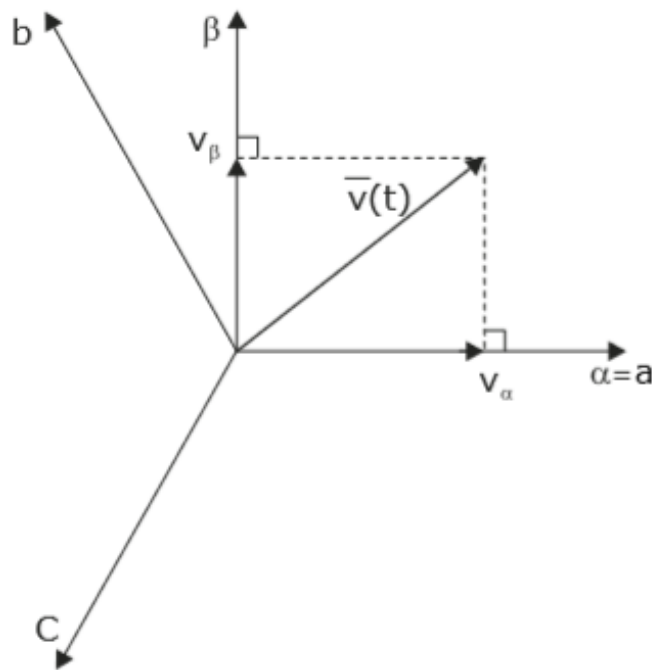


Fig. 5. Relación entre las variables $\alpha\beta$ y abc. Fuente: G. O. Jiménez M, “Armónicos: Cálculo de la Potencia Reactiva para la implementación de Bancos de condensadores en Cargas Aisladas”.

En las matrices de la 1 a 4 se expresan los cambios de coordenadas entre el sistema de coordenadas abc y el sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$ y viceversa:

Matriz de transformación de Clarke para tensión y corriente, esta dada por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

La transformación inversa de Clarke para tensión y corriente, esta dada por:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}$$

1.3.5 Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea

Es una teoría de control usada para el control de las corrientes de compensación armónicas y de mejora del factor de potencia en sistemas trifásicos de tres y cuatro hilos. Esta teoría también se conoce como Teoría PQ [8]. La teoría determina las potencias activa y reactiva instantáneas utilizando las componentes de Clarke de la tensión y corriente.

El cálculo de las potencias se realiza mediante la expresión:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$$

En la Teoría PQ interesa determinar cuáles son las corrientes de compensación que producen el efecto deseado en el sistema de potencia. En este caso, se aplica la siguiente relación matricial:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

1.3.6 Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea extendida

Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea extendida, es la misma Teoría PQ, solo que en esta la tensión de red $v_{\alpha\beta}$ es retardada 90° , tomando un nuevo nombre $\bar{v}_{\alpha\beta}$, donde la relación entre la tensión de la red y la tensión de la red desplazada es:

$$v_{\beta} = \bar{v}_{\alpha} \quad \text{Y} \quad v_{\alpha} = -\bar{v}_{\beta}$$

1.4 Sistema de Control

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado.

Definiciones utilizadas en un sistema de control

Las definiciones y conceptos básicos que forman parte de un sistema de control son:

- *Variable de proceso a controlar:* Es la variable que se quiere mantener en el valor deseado.
- *Valor de referencia:* Es el valor deseado para la variable a controlar.
- *Variable de perturbación:* Son variables externas al sistema de control que afectan a las variables controladas.
- *Variable de control:* Es la variable que se emplea para corregir el efecto de las perturbaciones.
- *Planta:* Cualquier objeto físico a ser controlado.
- *Procesos:* Cualquier operación a ser controlada. Ejemplos: procesos biológicos, químicos y económicos.
- *Sistema:* Es una combinación de componentes (procesos) que actúan juntos y llevando a cabo cierto objetivo. Un sistema no está limitado a los temas solamente físicos

1.4.1 Los elementos básicos de un sistema de control

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- *Sensores:* Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- *Controlador:* Compara el valor real de la salida (valores determinados por los sensores) con la entrada de referencia (el valor deseado), para calcular la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control.
- *Actuador:* Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y modifica las variables de control.

1.4.2 Estrategia de control

La estrategia de control hace referencia a la relación existente entre las variables medidas y/o controladas y las variables de control. Se distinguen dos tipos: Control de lazo abierto, y Control de lazo cerrado.

1.4.2.1 Control de lazo abierto (Open Loop Control)

Es que en que la señal de salida no afecta al funcionamiento total del sistema. Algunas de sus características son:

- No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).
- Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

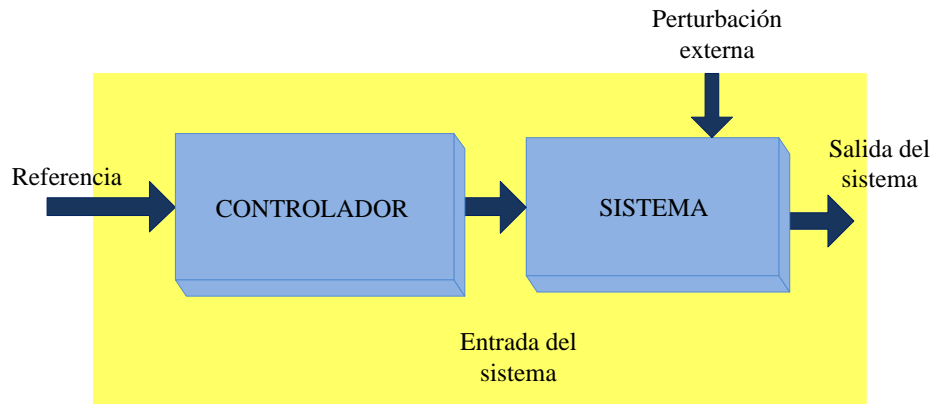


Fig. 6. Esquema de Control de Lazo Abierto.

Un ejemplo de sistema de lazo abierto es el semáforo. La señal de entrada es el tiempo asignado a cada luz (rojo, amarilla y verde) de cada una de las calles. El sistema cambia las luces según el tiempo indicado, sin importar que la cantidad de tránsito varíe en las calles [9].

1.4.2.2 Control de lazo cerrado

Aquellos en los que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control).

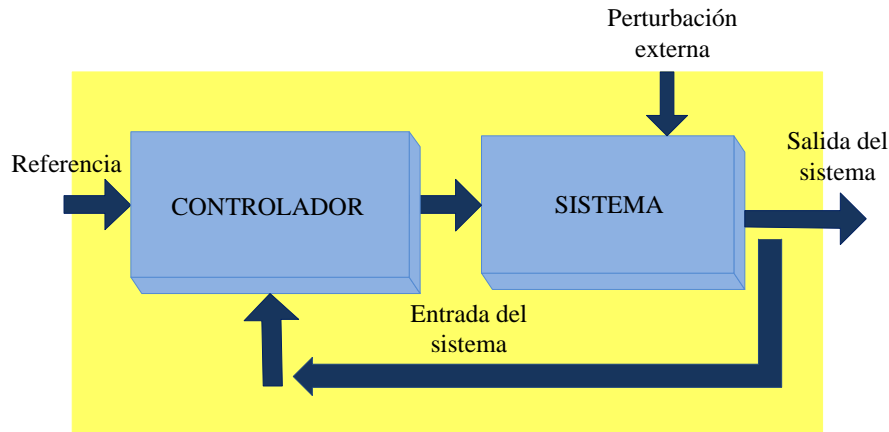


Fig. 7. Esquema de Control de Lazo Cerrado.

Un ejemplo de sistema de control de lazo cerrado sería el control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (la temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura, de la habitación se conserve en un nivel cómodo sin considerar las condiciones externas [9].

1.4.3 Sistema lineal

Un sistema es lineal si la salida sigue los cambios producidos en la entrada [9]. De la linealidad del sistema se destacan dos propiedades importantes:

- Si las entradas son multiplicadas por una constante, las salidas también son multiplicadas por la misma constante.
- Los sistemas lineales se caracterizan por el hecho de que se puede aplicar el principio de superposición.

1.4.4 Sistema No lineal

Sistemas no lineales son los sistemas regidos por ecuaciones no lineales, por ejemplo, ecuaciones diferenciales con coeficientes que son función de la variable dependiente, ecuaciones diferenciales parciales, multiplicación entre variables, funciones senoidales con argumentos en función de la variable dependiente, o cualquier otro tipo de ecuación funcional [9].

Los convertidores de potencia se clasifican como sistemas no lineales. El convertidor analizado en este proyecto de investigación es el convertidor CC- CA, también llamado inversor. Existen varios métodos para el control en inversores conectados a la red, siendo los más comunes:

- El control de histéresis, que aprovecha la naturaleza no lineal del inversor y los estados de conmutación de los semiconductores de potencia están determinados por la comparación de la variable medida con la referencia, considerando un ancho de histéresis dado para el error.
- El control lineal es el más utilizado en controladores con acción de control Proporcional-Integral (PI) y acción de control Proporcional-Integral-Derivativa (PID), su diseño se basa en un modelo del sistema para garantizar estabilidad a lazo cerrado en el dominio de la frecuencia obteniendo un resultado conservador y óptimo.
- El control de Modo Deslizante (Sliding Mode Control, SMC), el cual presenta frecuencia de conmutación variable, error en régimen permanente y baja dinámica en variaciones de carga.
- El control predictivo emplea un modelo de sistema para calcular predicciones del comportamiento futuro de las variables controladas y la utilización de un criterio de optimización para seleccionar la actuación apropiada.

1.4.5 Control Predictivo

El control predictivo es una estrategia de control que hace uso del modelo del sistema para predecir las salidas futuras y determinar la acción de control óptima en el momento presente, que permita minimizar el error futuro en la respuesta. Existen diferentes tipos de control predictivo, los cuales dependiendo de sus diferentes formas de modelamiento nos permite interactuar con el sistema, estos son:

- El control deadbeat, utiliza un modelo del sistema para calcular la tensión que anula el error en el tiempo de una muestra. Luego, la tensión es aplicada utilizando un modulador.
- El control predictivo basado en modelo (Model Based Predictive Control) generalizado por la sigla MPC, es una estrategia de control que hace uso del modelo del sistema para predecir las salidas futuras y determinar la acción de control óptima aplicada en el momento presente para minimizar el error futuro en la respuesta [2].

En aplicaciones de inversores conectados a la red es común aplicar control predictivo a tensión, corriente y potencia. En este proyecto se va a controlar la potencia activa (P) y reactiva (Q) que el inversor inyecta a la red. Las técnicas de control predictivo clásico para potencia presentan buen comportamiento bajo condiciones ideales de la fuente de tensión. En el caso de condiciones no ideales, no presentan buenos resultados y, por tanto, es conveniente utilizar otra técnica. La inquietud consiste en determinar cuál es la técnica adecuada para el caso de variaciones en la fuente de tensión.

Capítulo 2. Control Predictivo de Potencia Directa (PDPC)

2.1 Clasificación de PDPC

El Control Predictivo de Potencia Directa (PDPC) en los convertidores de potencia se puede clasificar según el vector de voltaje, como:

- El Control de Potencia basado en voltaje o Convencional (PDPC).
- El Control de Potencia basado en Flujo Virtual como o Convencional (VF-PDPC).

Los controladores también pueden clasificarse en términos de la Teoría de la Potencia Instantánea, en donde los controladores basados en la Teoría PQ tienen el prefijo "Convencional", mientras que los basados en la Teoría PQ extendida tienen el prefijo "Óptimo". Con la aplicación de la Teoría de Potencia Instantánea tenemos:

- Convencional (PDPC)
- Óptima (OPDPC)
- Convencional (VF-PDPC)
- Óptima (OVF-PDPC)

2.2.1 Control de Potencia basado en voltaje o Convencional (PDPC)

El control predictivo basado en voltaje, también es conocido en la literatura como Control de Potencia Convencional, este tipo de control tiene como variables de entrada los parámetros de la red V_{abc} , I_{abc} y como variable de la señal de salida de conmutación del inversor S_{abc} . En el siguiente diagrama de flujo se describe el control predictivo basado en voltaje (PDPC).

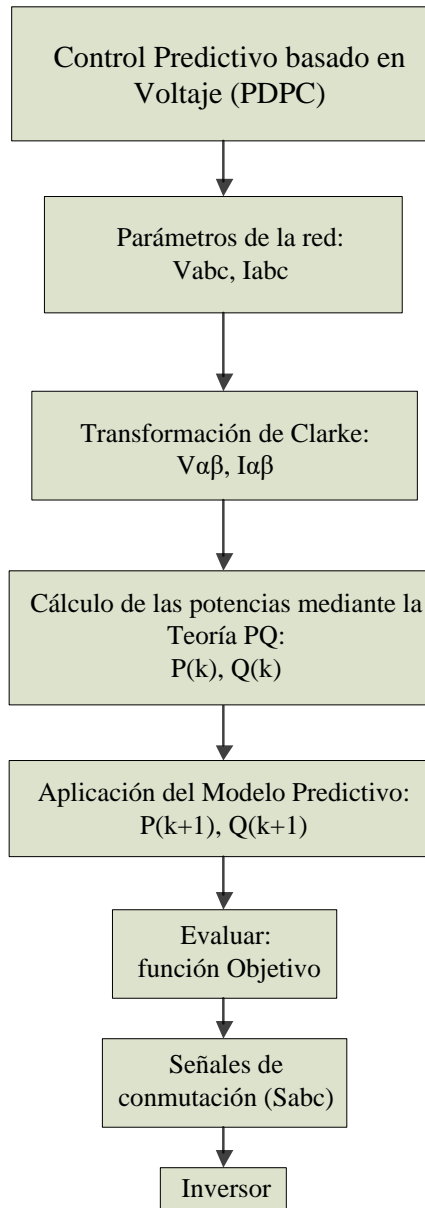


Fig. 9. Control de Potencia basado en voltaje (PDPC).

El algoritmo de Control Predictivo basado en Voltaje trabaja con tensiones y corrientes abc medidas tomadas del sistema, Estas variables se transforman a valores $\alpha\beta$ mediante la transformación de Clarke por medio de las matrices (1) y (2), para poder realizar el cálculo de la potencia activa instantánea (3) y reactiva instantánea (4) mediante la Teoría PQ. Luego es aplicado el modelo predictivo (5) y (6), donde es calculado el valor predictivo de potencia, utilizando los diferentes vectores de conmutación (ver Tabla 1), seleccionando el vector con el cual se minimiza la función objetivo (7), la cual compara los valores predictivos con los valores de referencia. Este algoritmo determina el vector óptimo de conmutación con el cual se obtiene la respuesta deseada en el siguiente período de muestreo, por último, el valor de potencia estimado es la señal de conmutación que es entregada al inversor para un funcionamiento adecuado.

Matriz de transformación de Clarke para tensión y corriente, esta dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}(K) \\ V_{\beta}(K) \\ V_0(K) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(K) \\ V_b(K) \\ V_c(K) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha}(K) \\ I_{\beta}(K) \\ i_0(K) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(K) \\ I_b(K) \\ I_c(K) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Potencia Activa

$$P(K) = \frac{3}{2} [V_{\alpha}(K) * I_{\alpha}(K) + V_{\beta}(K) * I_{\beta}(K)] \quad (3)$$

Potencia Reactiva

$$Q(K) = \frac{3}{2} [V_{\beta}(K) * I_{\alpha}(K) - V_{\alpha}(K) * I_{\beta}(K)] \quad (4)$$

Modelo predictivo:

$$P(K+1) = \frac{3}{2} [V_{\alpha}(K+1) * I_{\alpha} + V_{\beta}(K+1) * I_{\beta}(K+1)] \quad (5)$$

$$Q(K+1) = \frac{3}{2} [V_{\beta}(K+1) * I_{\alpha}(K+1) - V_{\alpha}(K+1) * I_{\beta}(K+1)] \quad (6)$$

Función objetivo:

$$G = (P_o - P(K+1))^2 + (Q_o - Q(K+1))^2 \quad (7)$$

2.2.2 Control Óptimo (OPDPC)

Este modelo presenta la misma estructura que el algoritmo de Control Convencional (PDPC), a diferencia de este, la tensión de red en coordenadas $\alpha\beta$ es retardada 90° , donde la relación entre la tensión de la red y la tensión de la red desplazada es:

$$V_{\alpha}(K) = -\overline{V_{\beta}}(K) \quad \text{Y} \quad V_{\beta}(K) = \overline{V_{\alpha}}(K) \quad (8)$$

2.2.3 Control de Potencia basado en Flujo Virtual como (VF-PDPC)

El control predictivo basado en Flujo Virtual tiene como variables de entrada los parámetros de la red V_{abc} , I_{abc} y como variable de la señal de salida de conmutación del inversor S_{abc} . En el siguiente diagrama de flujo se describe (VF-PDPC).

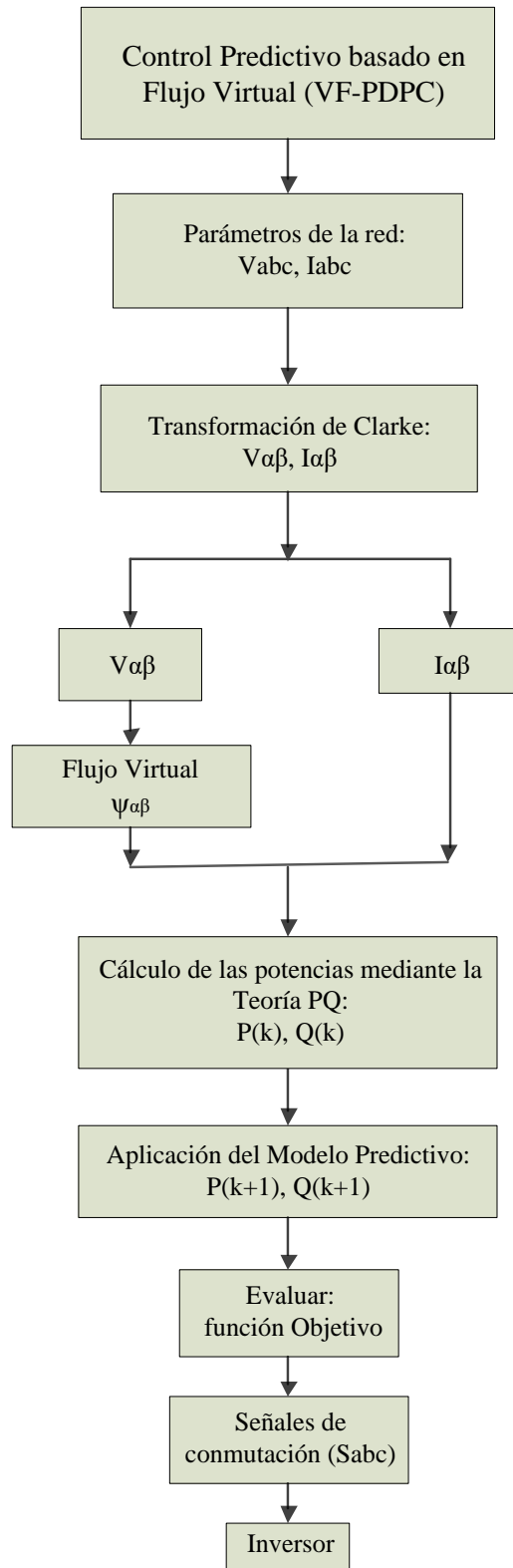


Fig. 10. Control de Potencia basado en Flujo Virtual como (VF-PDPC).

El algoritmo de control predictivo basado en Flujo Virtual trabaja con tensiones y corrientes abc medidas tomadas del sistema. Estas variables se transforman a valores $\alpha\beta$ mediante la transformación de Clarke por medio de las matrices (1) y (2). Como su nombre lo indica, este control trabaja haciendo uso de vectores de flujo en lugar de vectores de voltaje. Por lo tanto, la relación entre el flujo virtual de red $\Psi_{\alpha\beta}$ y el voltaje de red $V_{\alpha\beta}$ se expresa en (ver las ecuaciones 9, 10, y 11). Para poder realizar el cálculo de potencia activa instantánea y reactiva instantánea mediante la Teoría PQ en términos de $\Psi_{\alpha\beta}$. Luego es aplicado el modelo predictivo (14) y (15), donde es calculado el valor predictivo de potencia, utilizando los diferentes vectores de conmutación (ver Tabla 1), y se escoge el vector con el cual se minimiza la función objetivo en (16), donde se comparan los valores predictivos con los valores de referencia de potencia. El algoritmo determina el vector óptimo de conmutación con el cual se obtiene la respuesta deseada en el siguiente período de muestreo, por último, la potencia estimada es la señal de conmutación que es entregada al inversor para un funcionamiento adecuado.

Tensiones en coordenadas $\alpha\beta$:

$$V_{\alpha}(K) = \hat{V}_g \sin(\omega t) \quad V_{\beta}(K) = -\hat{V}_g \cos(\omega t) \quad (9)$$

Flujos Virtual $\alpha\beta$:

$$\Psi_{\alpha}(K) = \int \hat{V}_g \sin(\omega t) dt = \frac{V_{\beta}(K)}{\omega} \quad \Psi_{\beta}(K) = -\int \hat{V}_g \cos(\omega t) dt = -\frac{V_{\alpha}(K)}{\omega} \quad (10)$$

Tensiones $\alpha\beta$ en función del Flujo Virtual:

$$V_{\beta}(K) = \omega \Psi_{\alpha}(K) \quad \text{Y} \quad V_{\alpha}(K) = -\omega \Psi_{\beta}(K) \quad (11)$$

Potencia activa:

$$P(K) = \frac{3}{2} \omega \left[\Psi_{\alpha}(K) * I_{\beta}(K) - \Psi_{\beta}(K) * I_{\alpha}(K) \right] \quad (12)$$

Potencia Reactiva:

$$Q(K) = \frac{3}{2} \omega \left[\Psi_{\alpha}(K) * I_{\alpha}(K) + \Psi_{\beta}(K) * I_{\beta}(K) \right] \quad (13)$$

Modelo Predictivo:

$$P(K+1) = \frac{3}{2} \omega \left[\Psi_{\alpha}(K+1) * I_{\beta}(K+1) - \Psi_{\beta}(K+1) * I_{\alpha}(K+1) \right] \quad (14)$$

$$Q(K+1) = \frac{3}{2} \omega \left[\Psi_{\alpha}(K+1) * I_{\alpha}(K+1) + \Psi_{\beta}(K+1) * I_{\beta}(K+1) \right] \quad (15)$$

Función de Objetivo:

$$G = (P_o - P(K+1))^2 + (Q_o - Q(K+1))^2 \quad (16)$$

2.2.4 Control Óptimo (OVF-PDPC)

Este modelo presenta la misma estructura que el algoritmo de Control Convencional (VF-PDPC), a diferencia de este, la tensión de red en coordenadas $\alpha\beta$ es expresada en términos del flujo de virtual mediante la expresión:

$$\overline{V}_{\alpha}(K) = -\omega \overline{\Psi}_{\beta}(K) \quad \text{Y} \quad \overline{V}_{\beta}(K) = \omega \overline{\Psi}_{\alpha}(K) \quad (17)$$

Capítulo 3. Simulación

3.1 Software - Matlab/Simulink

Matlab es un programa muy utilizado en ingeniería destinado a realizar cálculos técnicos, científicos y de propósito general. En él se encuentran operaciones de cálculo, visualización y programación, donde la interacción con el usuario emplea una notación matemática sencilla.

Los usos y aplicaciones típicos de Matlab son:

- Matemáticas y cálculo.
- Desarrollo de algoritmos.
- Adquisición de datos.
- Modelado, simulación y prototipado.
- Análisis y procesamiento de datos.
- Gráficos científicos y de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones.

Esta herramienta de cómputo altamente intuitiva cuenta con un ambiente de simulación por bloques llamado Simulink. Esta aplicación permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo. Simulink dispone de una serie de funciones que facilitan la visualización, análisis y almacenamiento de los resultados [10].

3.2 Entorno de trabajo de Simulink

Para realizar cualquier actividad, se debe abrir el entorno de trabajo de Simulink que se muestra en Fig. 11.

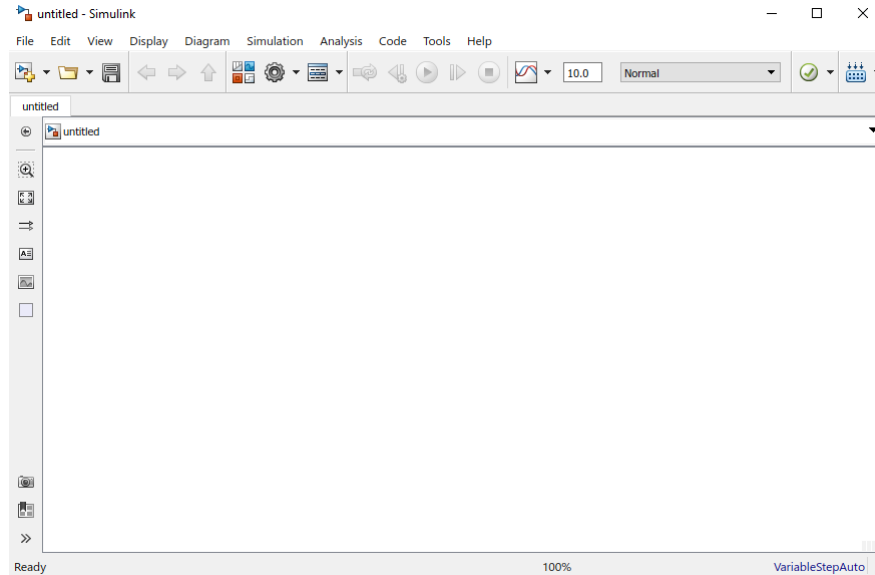


Fig. 11. Entorno de trabajo de Simulink.

Las herramientas que se van a utilizar las podemos encontrar en el *Simulink Library Browser*, que se muestra en la Fig. 12.

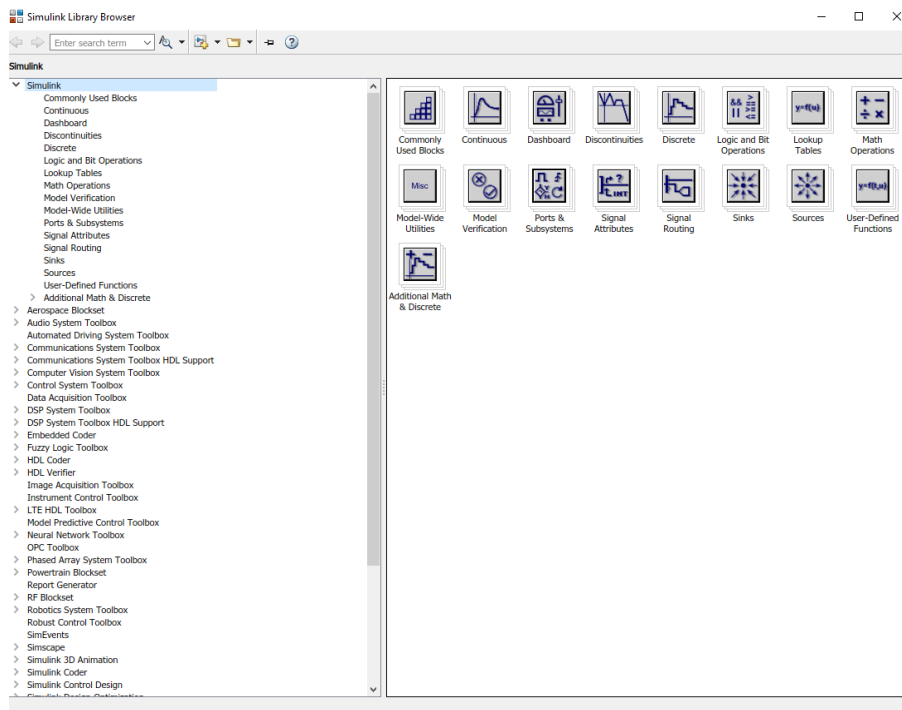


Fig. 12. Librerías de Simulink.

Algunas de las librerías que se despliegan de Specialized Tecnology son:

- *ElectricalSources*: Esta sub-librería contiene fuentes de corriente y voltaje: DC, AC, monofásicas y trifásicas Además tiene baterías y fuentes controladas.
- *Elements*: Contiene interruptores, transformadores, inductores acoplados, y elementos pasivos para modelar impedancias y cargas principalmente.
- *Measurements*: En esta librería se encuentran elementos para medición de voltajes y corrientes en circuitos monofásicos y trifásicos.
- *Power Electronics*: Contiene elementos electrónicos como diodos, mosfets, tiristores, IGBTs, GTOs, entre otros.
- *Powergui*: Este bloque configura el modo de simulación.

3.3 Ejemplo: Circuito básico de Electrónica de Potencia en Simulink

A manera de ejemplo, en la Fig. 13. se muestra la implementación de un inversor con carga RL en Simulink. El bloque definido como control es un subsistema que entrega las señales de conmutación de los dispositivos que conforman el inversor de potencia. Para la implementación del circuito anterior se utilizaron las librerías que se indican en la Tabla. 2.

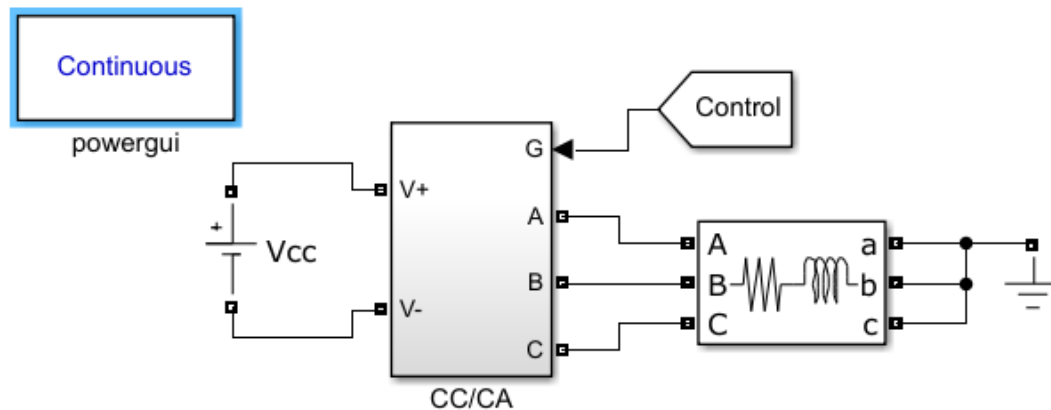


Fig. 13. Inversor sencillo para una carga trifásica.

Elementos	Librerías
Power Guide	Power Systems/ Specialized Technology/ Fundamental Blocks
DC Voltage Source	Power Systems/ Specialized Technology/ Fundamental Blocks
Variant Subsystems	HDL Coder/ Ports & Subsystems
Three-Phase RL	Power Systems/ Specialized Technology/ Elements
Ground	Power Systems/ Specialized Technology/ Elements

Tabla 2. Elementos y librerías necesarias para la implementación en Simulink/Matlab para Inversor trifásico con carga RL.

3.4 Sistema de Prueba

En aplicaciones de inversores conectados a la red es común aplicar control predictivo a tensión, corriente y potencia. En este proyecto se va a controlar la Potencia Activa (P) y la Potencia Reactiva (Q) que el inversor inyecta a la red, empleando diferentes técnicas de control predictivo. En Fig. 14. se muestra el sistema de prueba a implementar. El sistema de prueba consiste de un inversor conectado a la red mediante una impedancia RL.

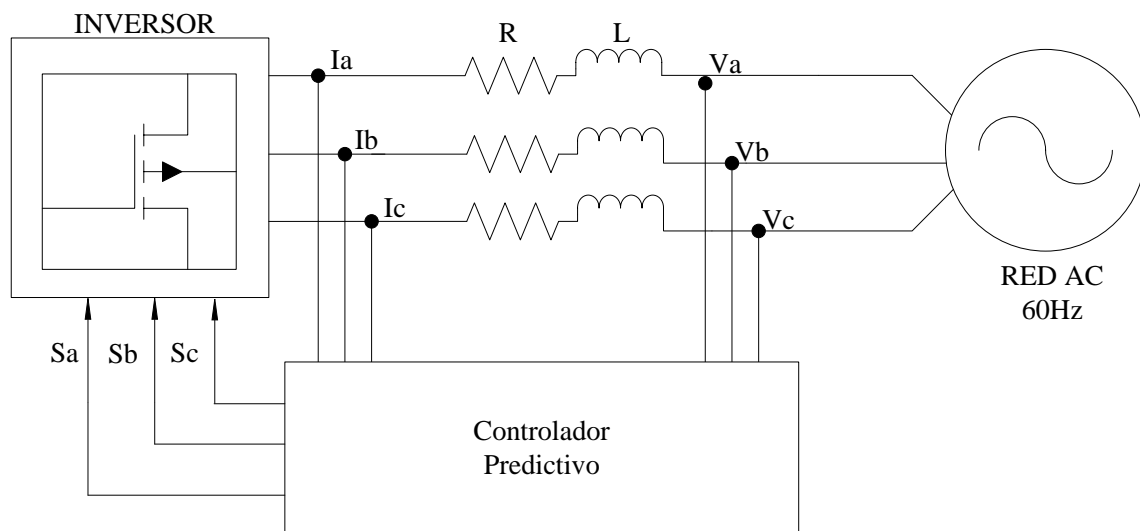


Fig. 14. Sistema de Prueba.

Los parámetros del sistema se muestran en la siguiente Tabla. 3.

Voltaje AC	220 V
Frecuencia de Línea	60 Hz
Periodo de muestreo	1e-6 s
Voltaje DC	220 V

Tabla 3. Parámetros del sistema.

Los valores de referencia de potencia activa y reactiva para el controlador son:

Po	6kW	0<t<15ms
	5kW	15<t<30ms
Qo	2kVar	0<t<15ms
	3kVar	15<t<30ms

Tabla 4. Valores de referencia.

3.5 Casos de Estudio

Para analizar el comportamiento de los controladores se consideran tres casos en el comportamiento de la red: Tensión Balanceada, Tensión Desbalanceada, Tensión Desbalanceada con Armónicos. (Ver Tabla 5).

CASOS		Tensiones
Ítem	Descripción	Va(t), Vb(t), Vc(t)
1.	Balanceado	$V_a(t)=170\text{sen}(377t)$ $V_b(t)=170\text{sen}(377t-120^\circ)$ $V_c(t)=170\text{sen}(377t+120^\circ)$
2.	Desbalanceado	$V_a(t)=170\text{sen}(377t)$ $V_b(t)=165\text{sen}(377t+120^\circ)$ $V_c(t)=175\text{sen}(377t-120^\circ)$
3.	Desbalanceado y con armónicos	$V_a(t)=170\text{sen}(377t)+170\text{sen}(754t)+170\text{sen}(1131t)$ $V_b(t)=165\text{sen}(377t+120^\circ)+165\text{sen}(754t+120^\circ)+165\text{sen}(1131t+120^\circ)$ $V_c(t)=175\text{sen}(377t-120^\circ)+175\text{sen}(754t-120^\circ)+175\text{sen}(1131t-120^\circ)$

Tabla 5. Valores de referencia.

3.6 Algoritmos de Control

A continuación, se muestra el diagrama de bloques de cada algoritmo de control.

Control Predictivo Convencional (PDPC)

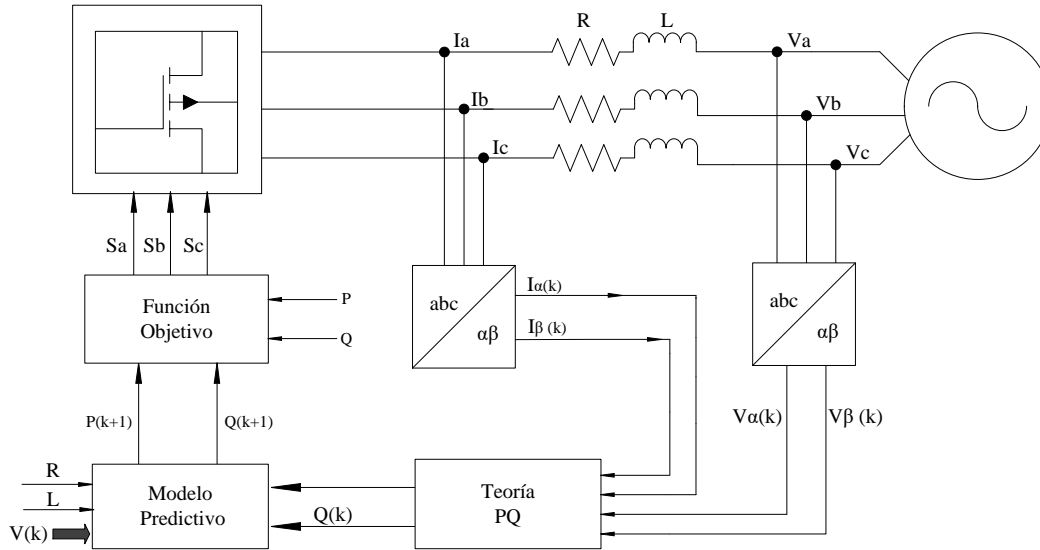


Fig. 15. Control Predictivo Convencional (PDPC).

Control Predictivo Óptimo (OPDPC)

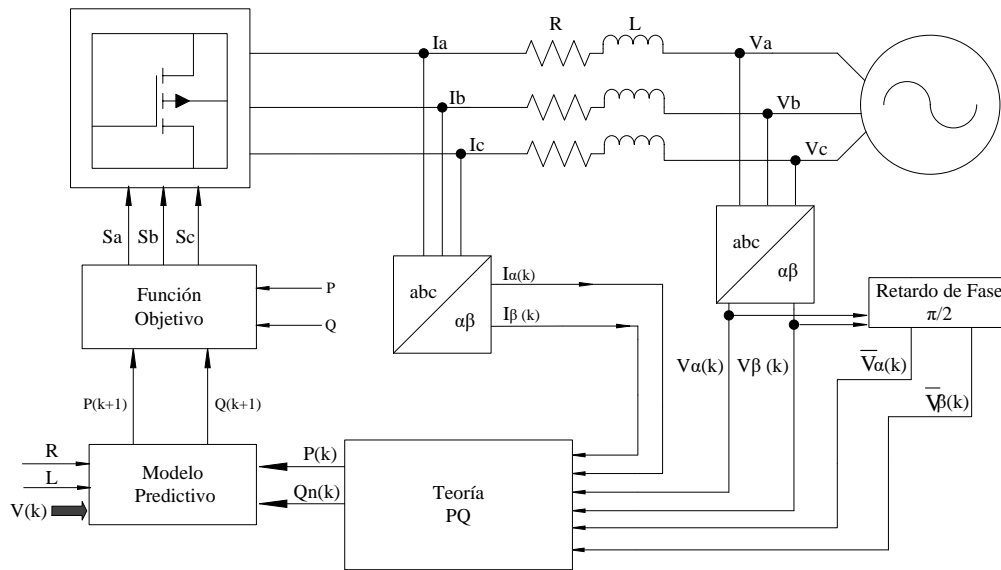


Fig. 16. Control Predictivo Optimo (PDPC).

Control Predictivo de Flujo Virtual Convencional (VF-PDPC)

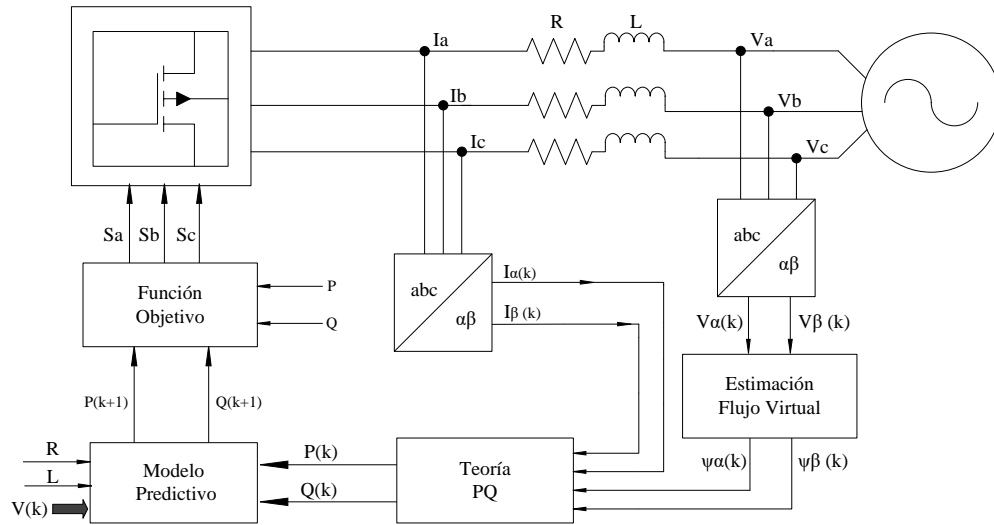


Fig. 17. Control Predictivo de Flujo Virtual Convencional (VF-PDPC).

Control Predictivo Flujo Virtual Óptimo (OVF-PDPC)

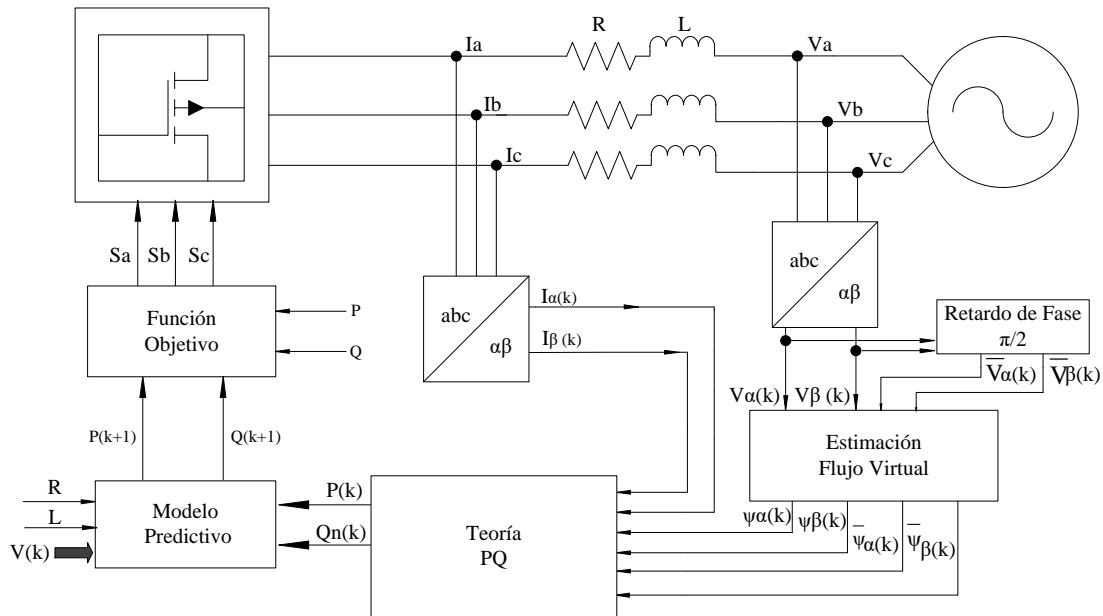


Fig. 18. Control Predictivo Flujo Virtual Óptimo (VF-PDPC).



3.7 Resultados

A continuación, se muestran los resultados de simulación obtenidos para el Control Predictivo Convencional (PDPC), Control Predictivo Óptimo (OPDPC), Control Predictivo basado en Flujo Virtual (VF-PDPC) y Control Predictivo Óptimo basado en Flujo Virtual (OVF-PDPC). Los casos de estudio considerados son: CASO 1: Tensión Balanceada, CASO 2: Tensión Desbalanceada, CASO 3: Tensión Desbalanceada y con contenido armónico. Cada gráfica incluye el comportamiento que tiene la tensión, corriente, potencia activa y potencia reactiva en el punto de conexión del convertidor con la red.

3.7.1 CONVENCIONAL (PDPC)

3.7.1.1 CASO 1

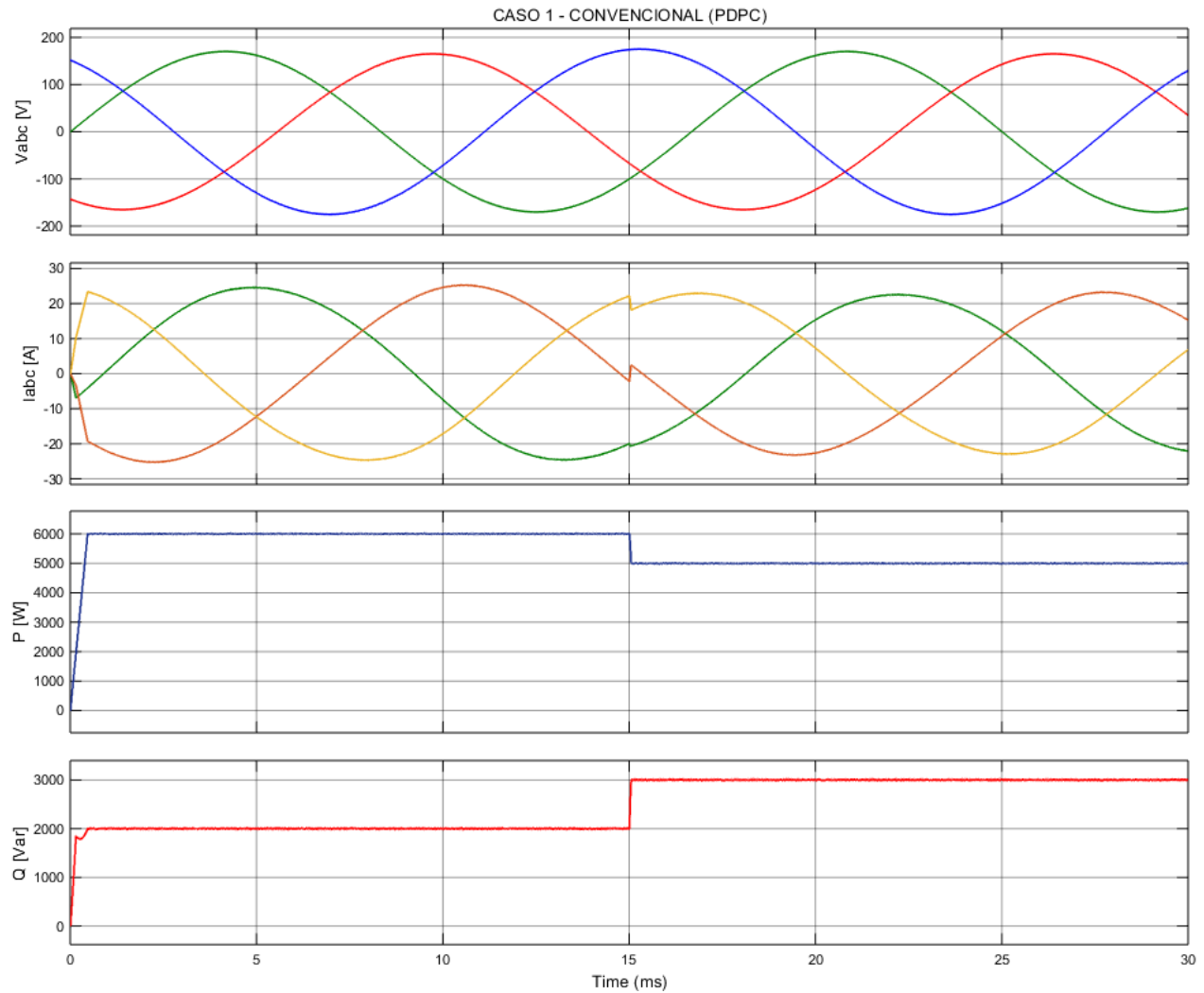


Fig. 19. CASO 1 - CONVENCIONAL (PDPC)

3.7.1.2 CASO 2

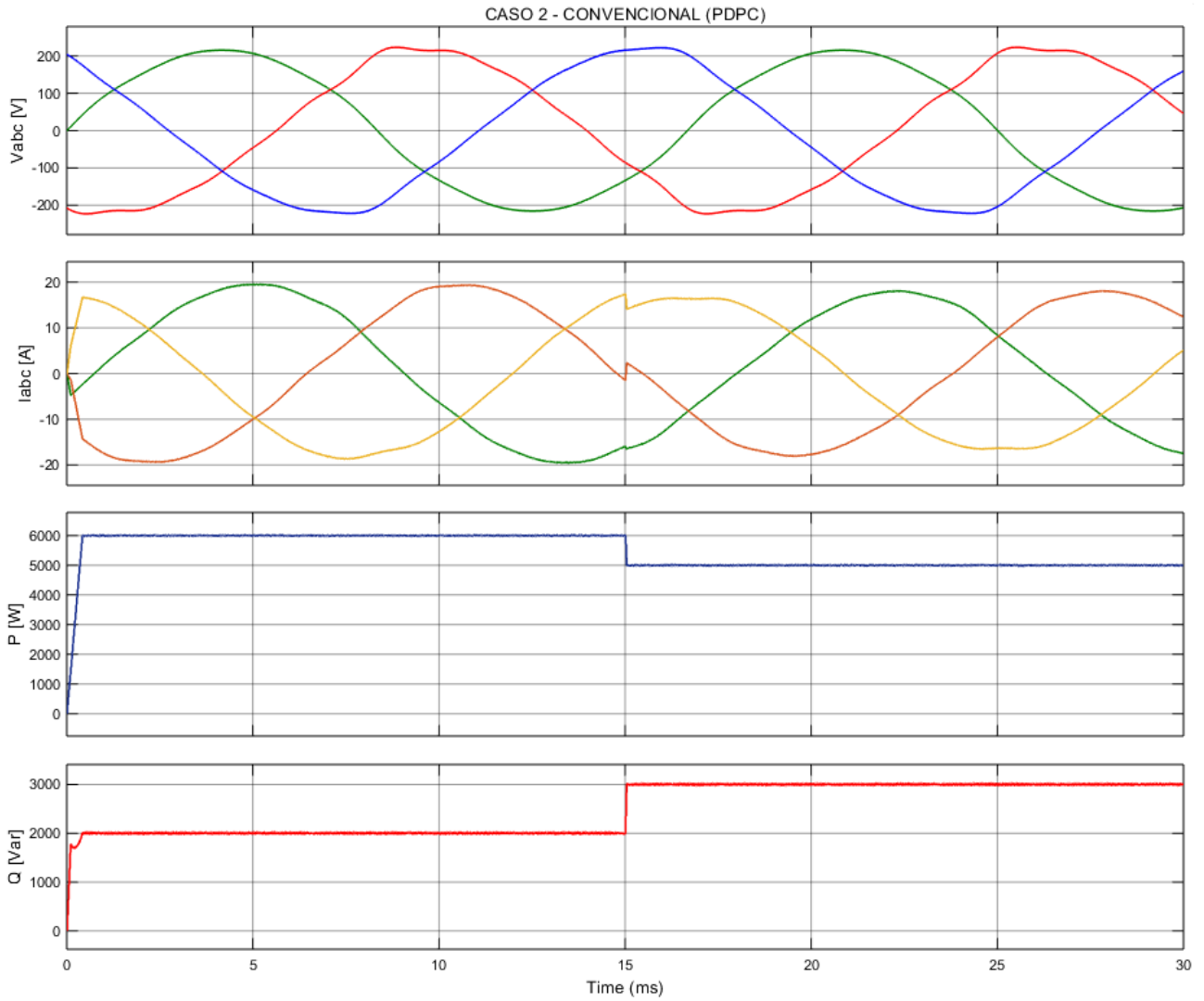


Fig. 20. CASO 2 - CONVENCIONAL (PDPC)

3.7.1.3 CASO 3

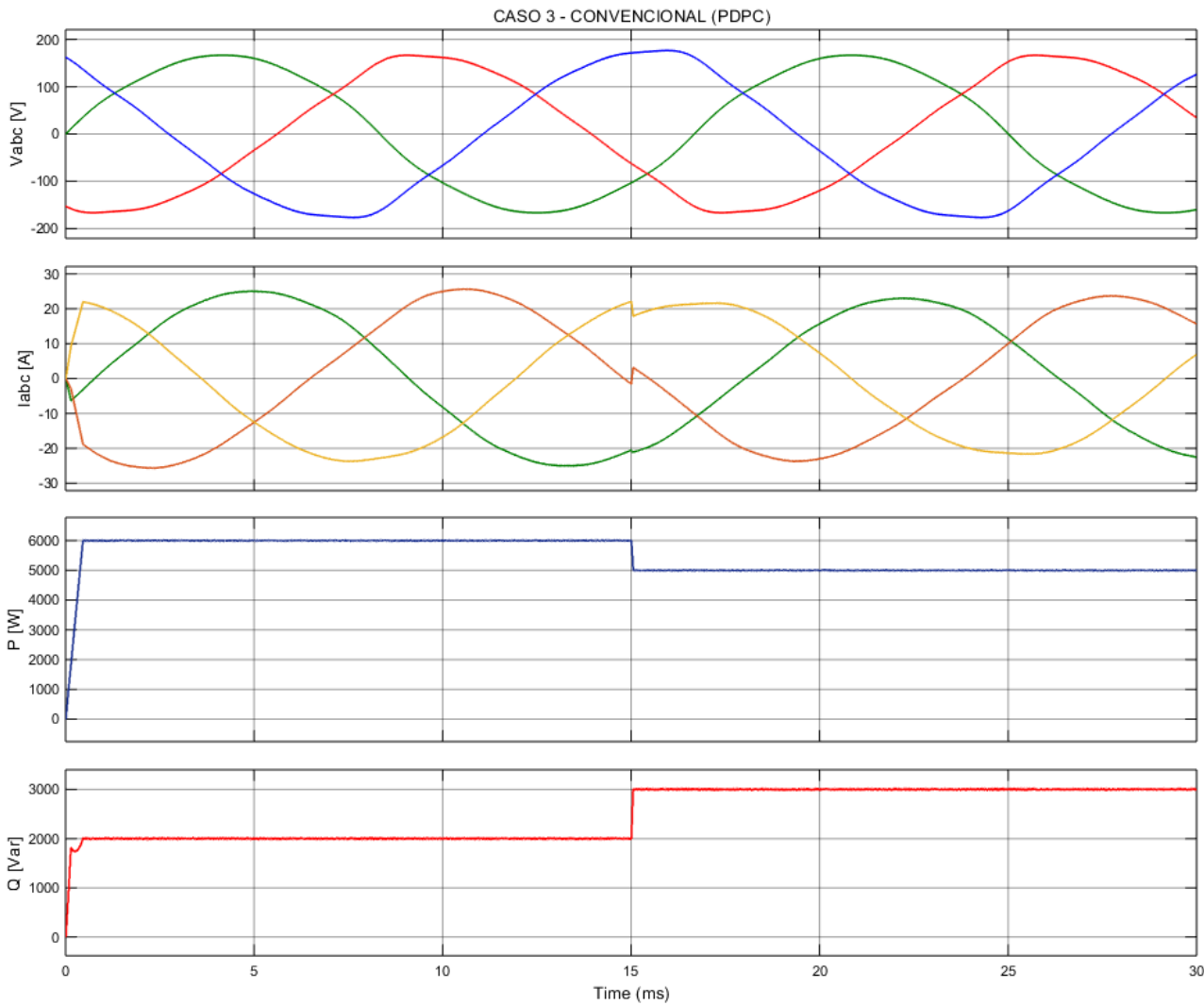


Fig. 21. CASO 3 - CONVENCIONAL (PDPC)

3.7.2 OPTIMO (OPDPC)

3.7.2.1 CASO 1

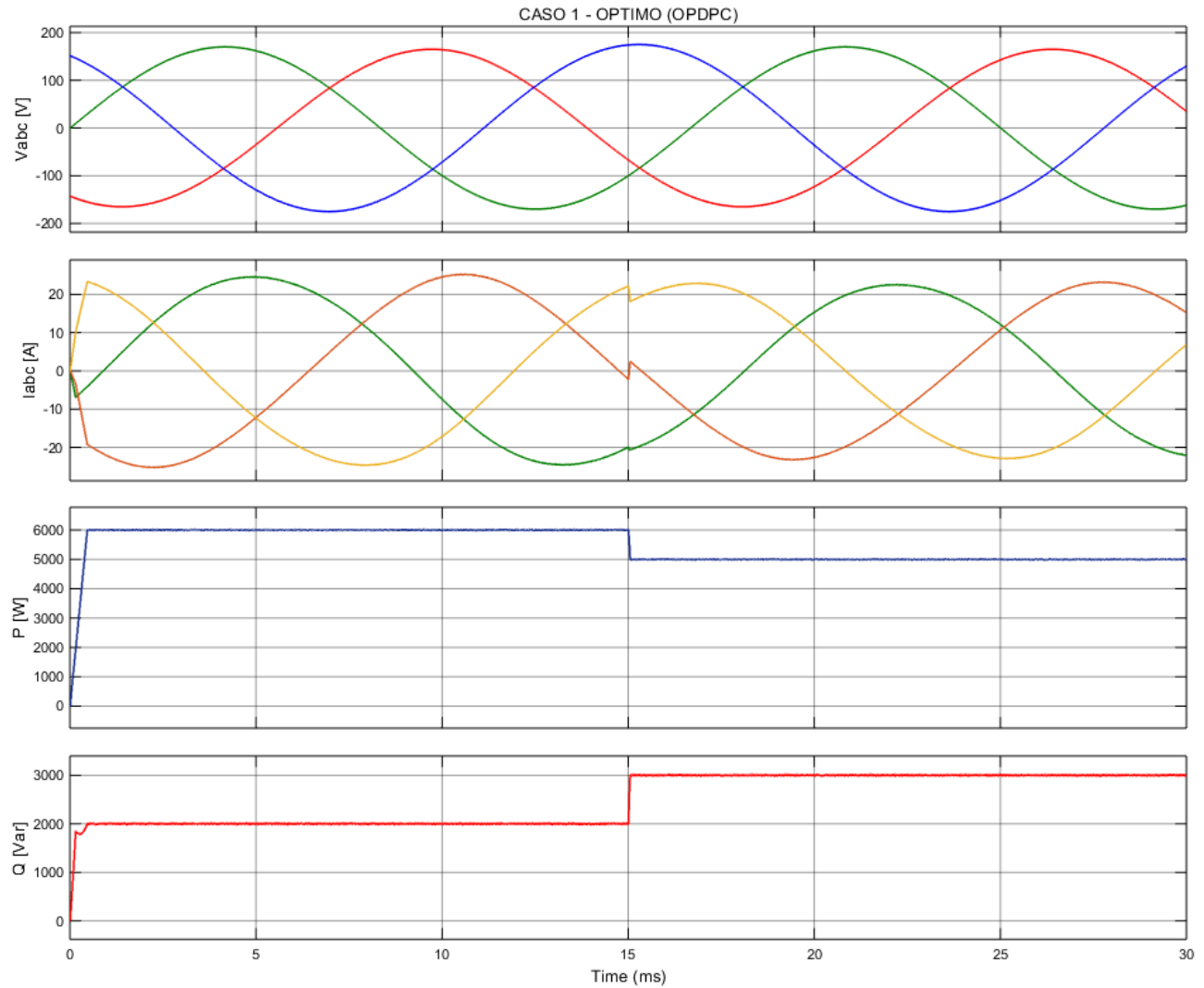


Fig. 22. CASO 1 - ÓPTIMO (OPDPC)

3.7.2.2 CASO 2

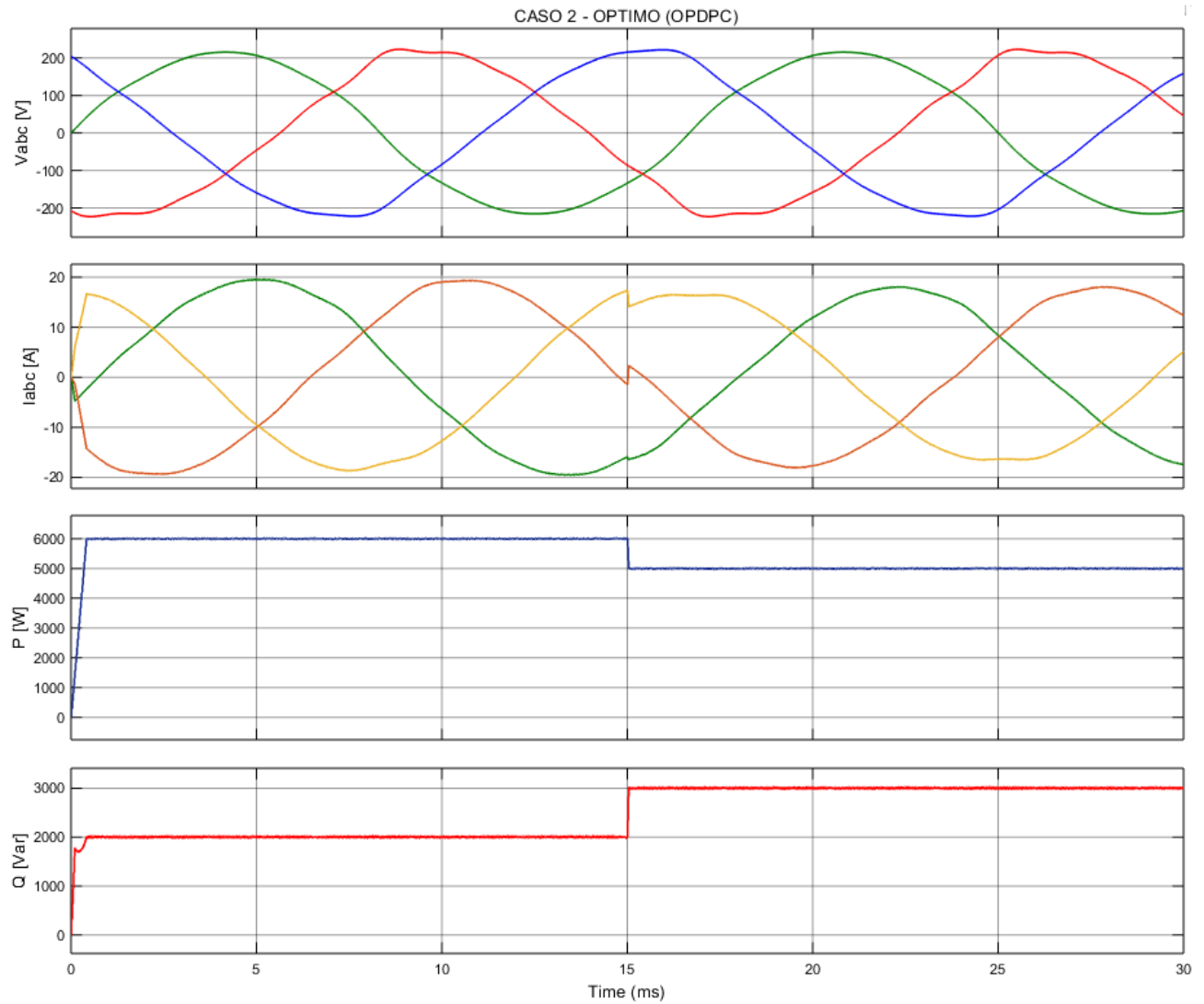


Fig. 23. CASO 2 - ÓPTIMO (OPDPC)

3.7.2.3 CASO 3

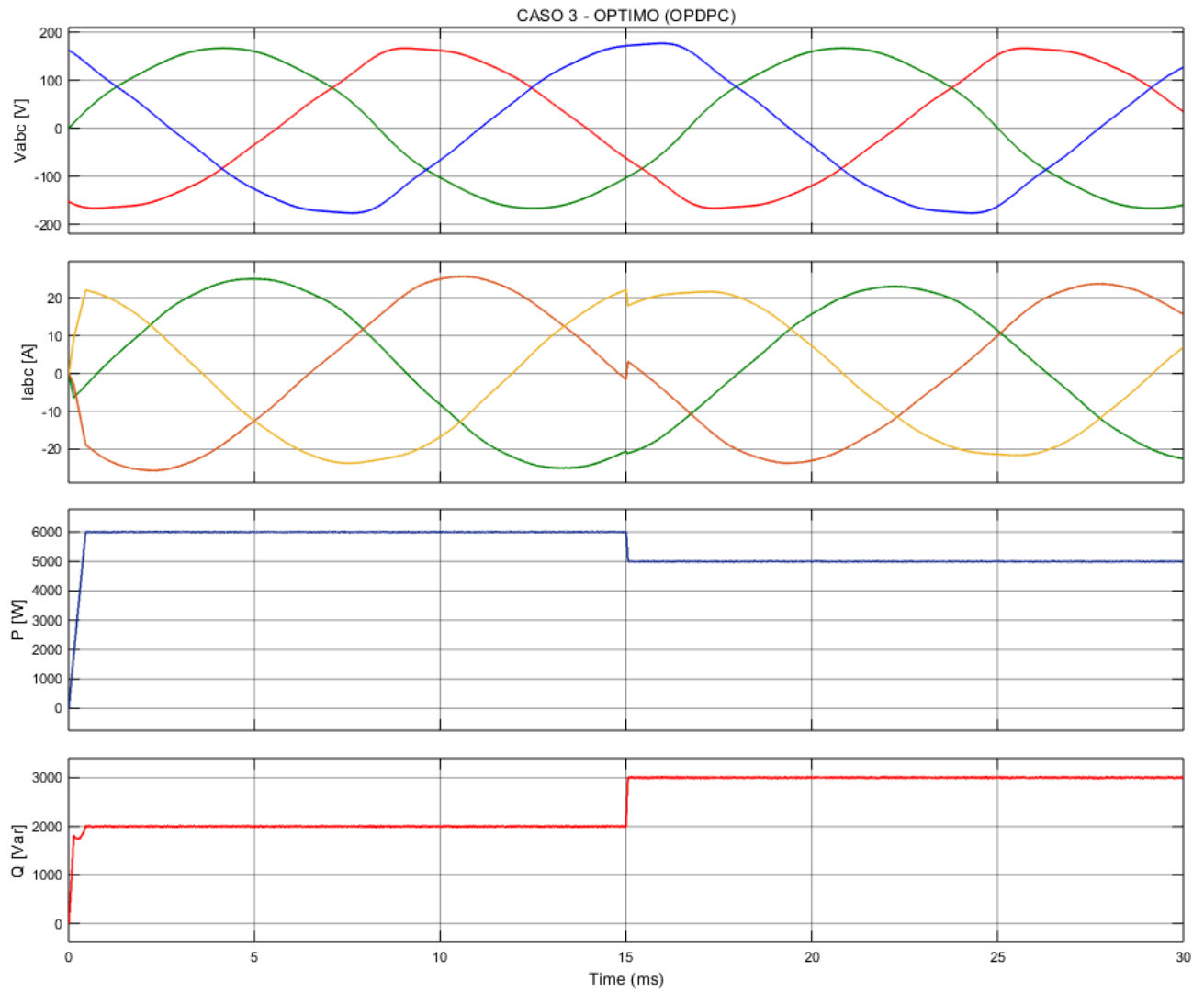


Fig. 24. CASO 3 - ÓPTIMO (OPDPC)

3.7.3 CONVENCIONAL (VF-PDPC)

3.7.3.1 CASO 1

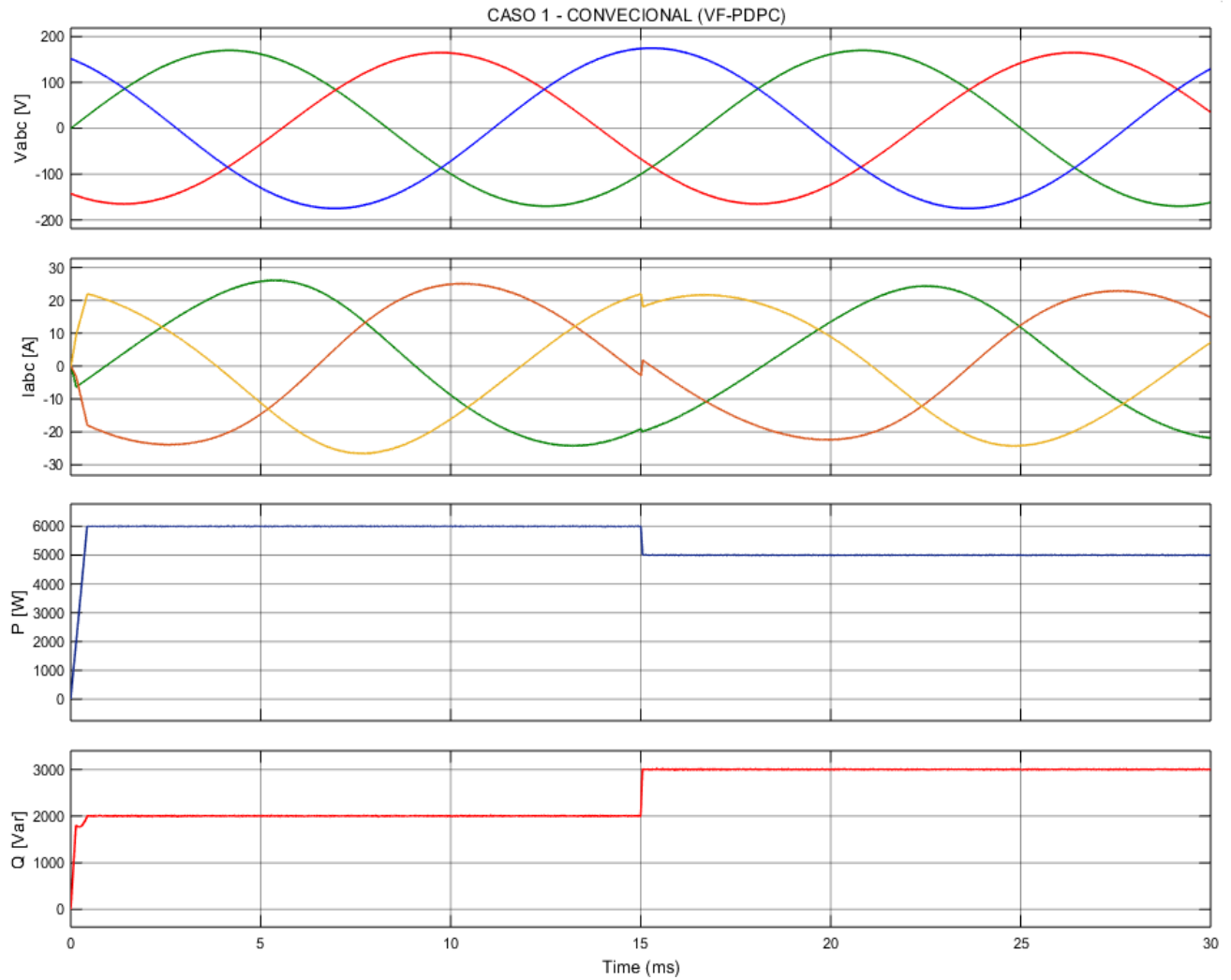


Fig. 25. CASO 1 - CONVENCIONAL (VF - PDPC)

3.7.3.2 CASO 2

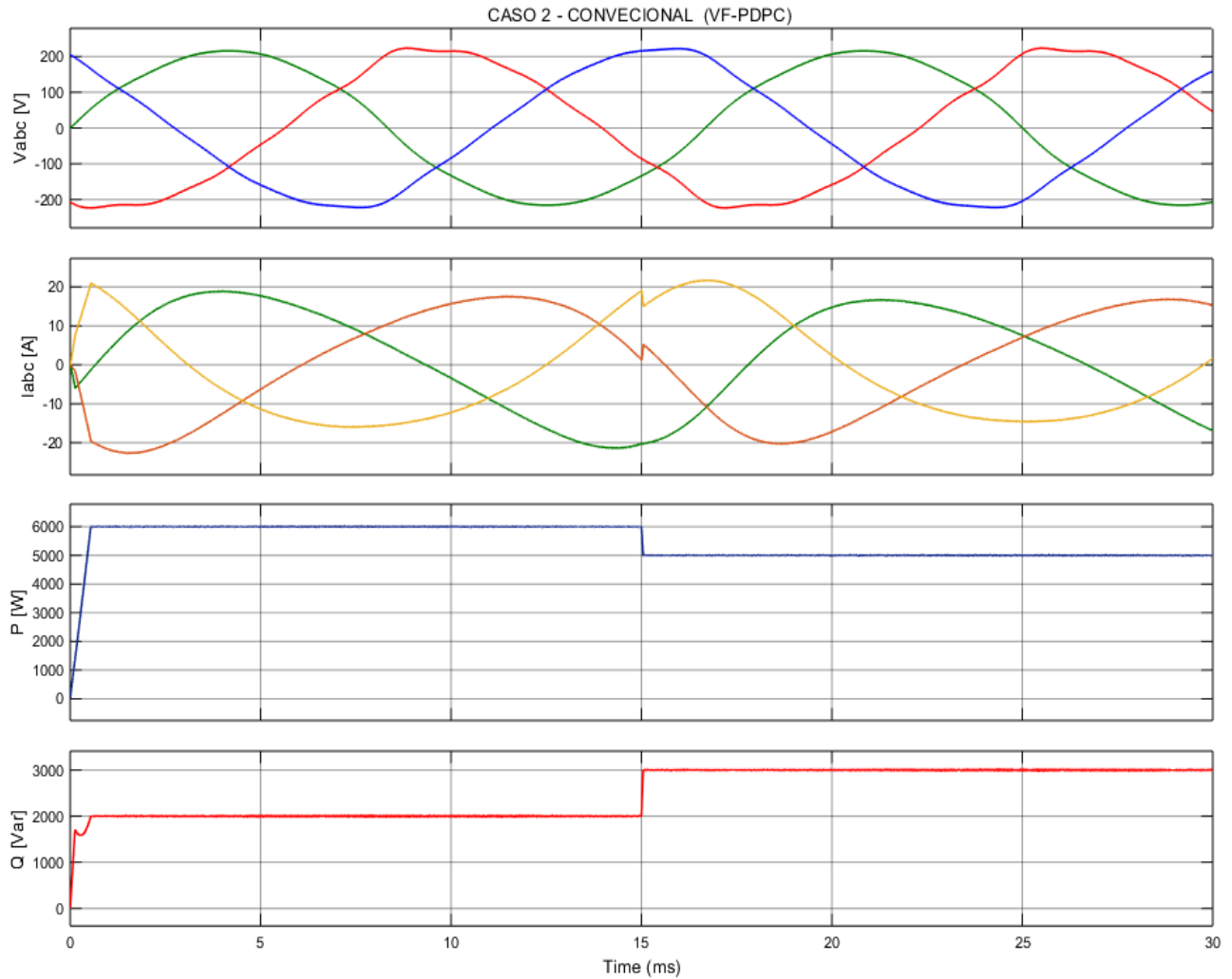


Fig. 26. CASO 2 - CONVENCIONAL (VF - PDPC)

3.7.3.3 CASO 3

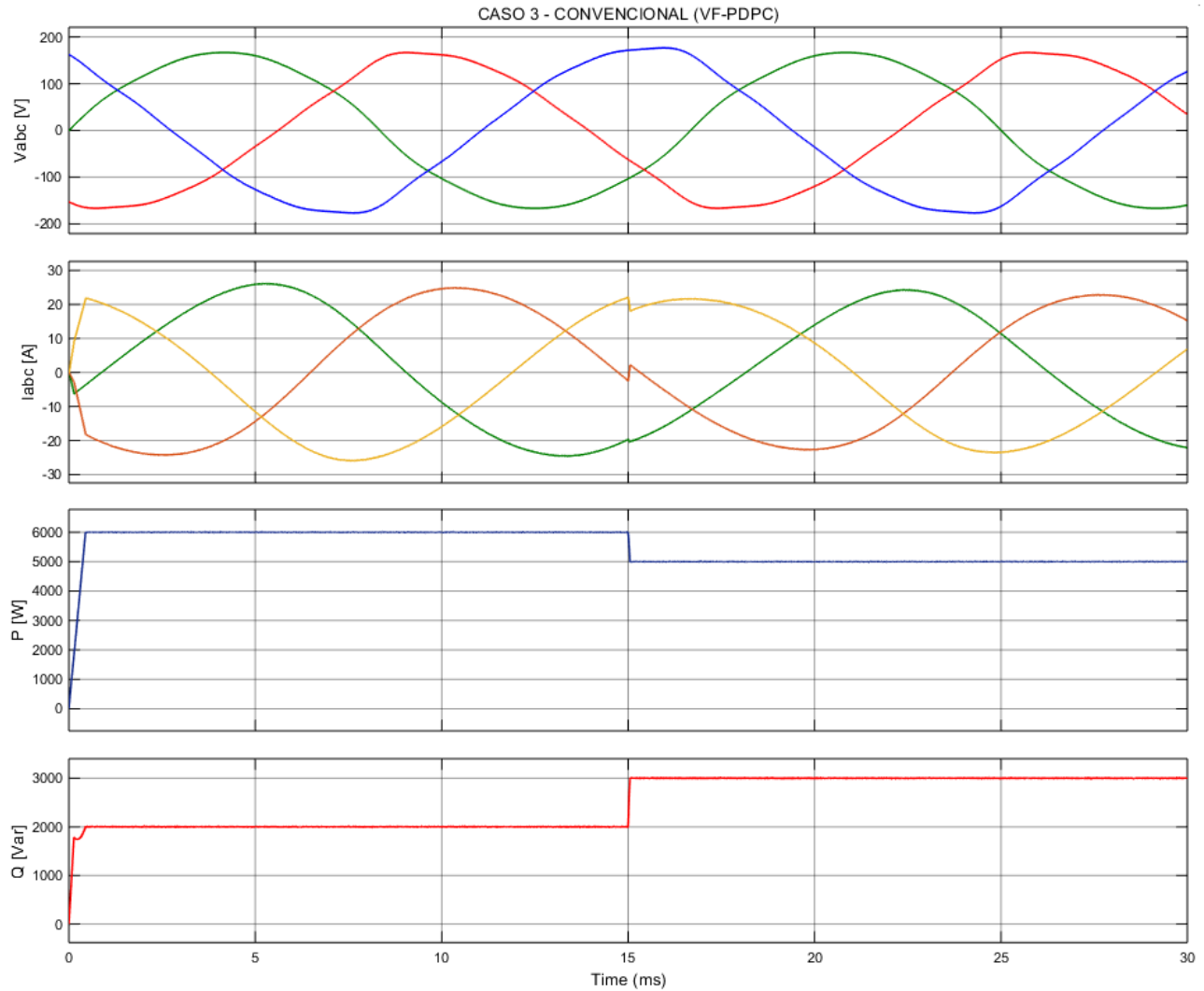


Fig. 27. CASO 3 - CONVENCIONAL (VF - PDPC)

3.7.4 OPTIMO (OVF-PDPC)

3.7.4.1 CASO 1

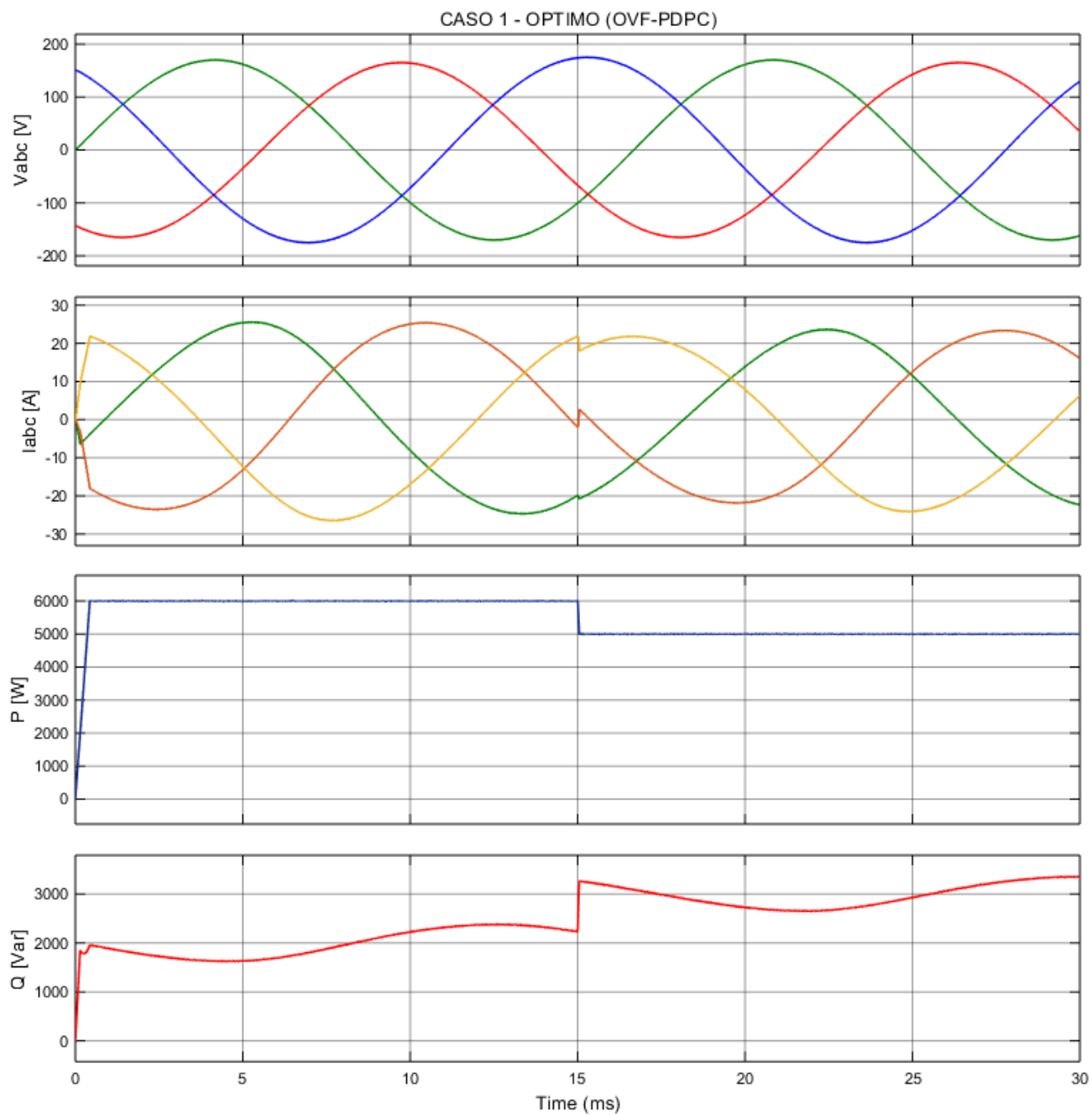


Fig. 28. CASO 1 - ÓPTIMO (OVF - PDPC)

3.7.4.2 CASO 2

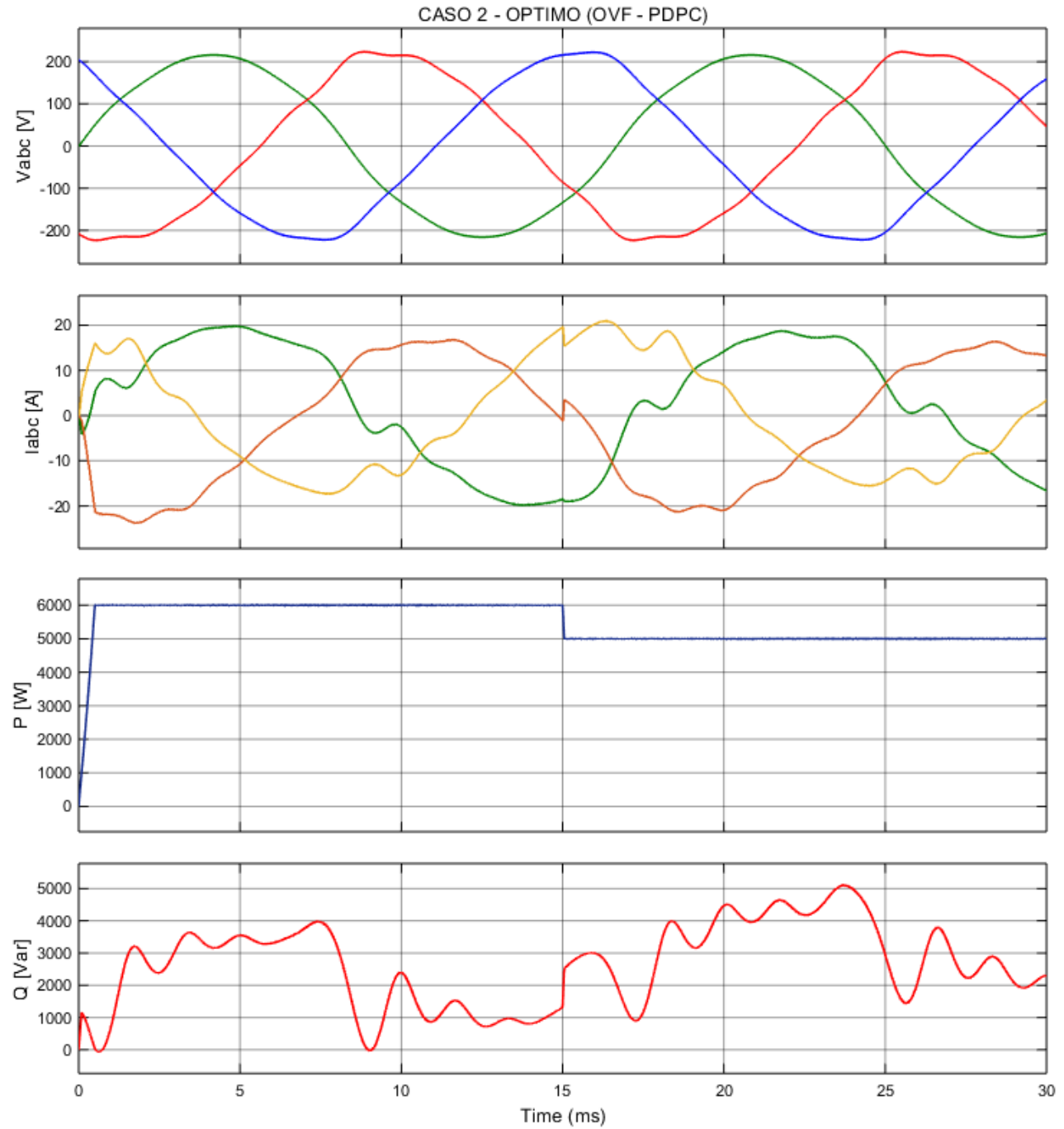


Fig. 29. CASO 2 - ÓPTIMO (OVF - PDPC)

3.7.4.3 CASO 3

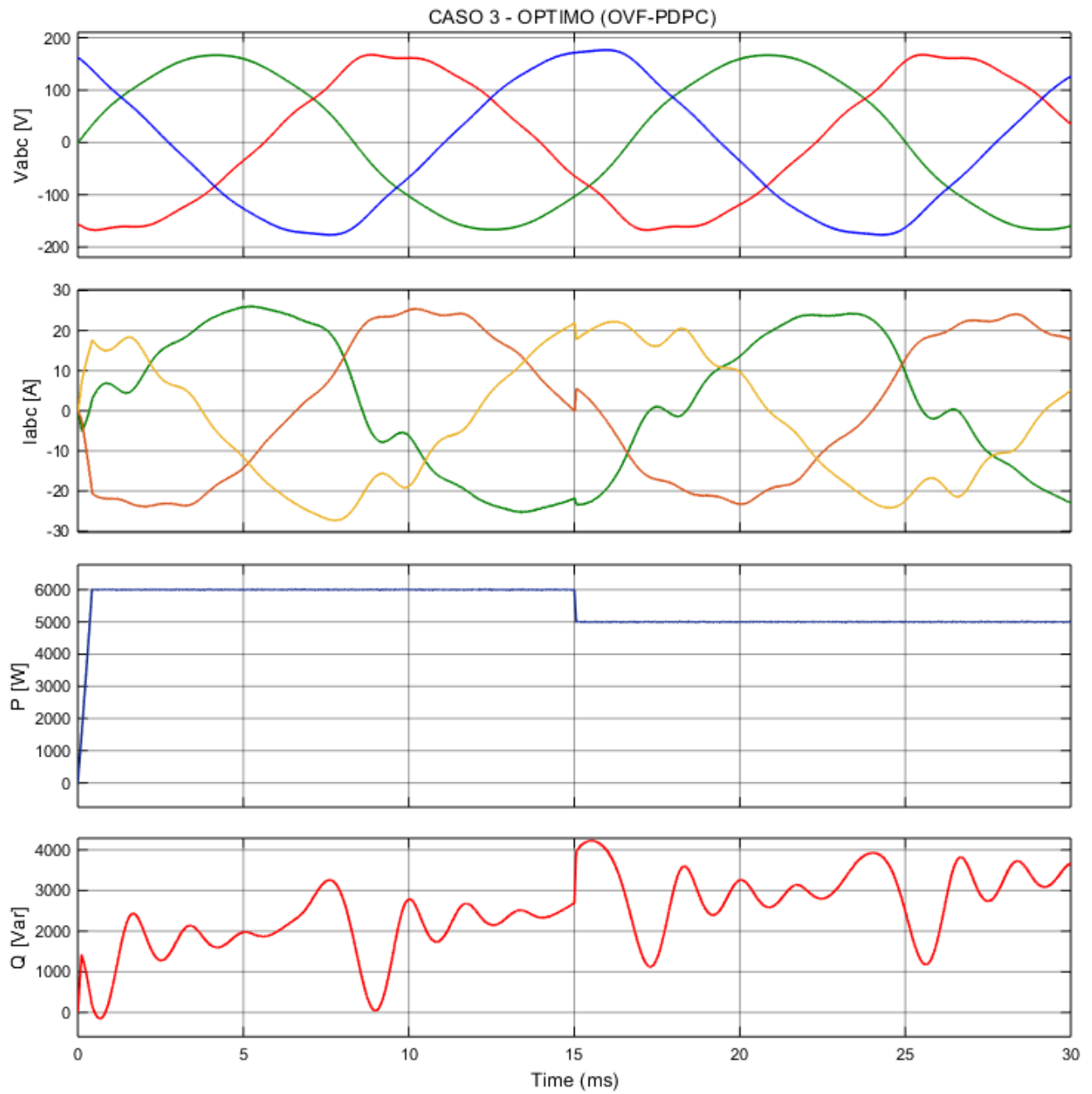


Fig. 30. CASO 3 - ÓPTIMO (OVF - PDPC)

3.8 Análisis de Resultados

En el capítulo anterior se observan los resultados de simulación obtenidos para el Control Predictivo Convencional (PDPC), Control Predictivo Óptimo (OPDPC), Control Predictivo basado en Flujo Virtual (VF-PDPC) y Control Predictivo Óptimo basado en Flujo Virtual (OVF-PDPC). Los casos de estudio considerados fueron: CASO 1: Tensión Balanceada, CASO 2: Tensión Desbalanceada, CASO 3: Tensión Desbalanceada y con contenido armónico. Cada una de las gráficas incluye el comportamiento que presentó la tensión, corriente, potencia activa y potencia reactiva en el punto de conexión del convertidor con la red. Los resultados de cada una de las técnicas de control se resumen en las siguientes tablas:

VARIABLE (CASO)	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA
1	Sinusoidal	Sinusoidal con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.
2	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.
3	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.

Tabla 6. Análisis resultados PDPC.

VARIABLE (CASO)	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA
1	Sinusoidal	Sinusoidal con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.
2	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.
3	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.

Tabla 7. Análisis resultados OPDPC.

VARIABLE (CASO)	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA
1	Sinusoidal	Sinusoidal con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.
2	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.
3	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.

Tabla 8. Análisis resultados VF-PDPC.

VARIABLE (CASO)	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA
1	Sinusoidal	Sinusoidal con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Se comporta inadecuadamente mediante cambios de referencia.
2	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Se comporta inadecuadamente mediante cambios de referencia.
3	Distorsionada	Distorsionada con perturbaciones en las transiciones.	Sigue perfectamente los cambios de referencia.	Se comporta inadecuadamente mediante cambios de referencia.

Tabla 9. Análisis resultados OVF-PDPC.

Capítulo 4. Conclusiones

El control predictivo es una estrategia de control que hace uso del modelo del sistema para predecir las salidas futuras y determinar la acción de control óptima en el momento presente, que permita minimizar el error futuro en la respuesta. Existen diferentes tipos de control predictivo. Los principales son el control dead-beat, control predictivo basado en trayectoria y control basado en el modelo. El control predictivo basado en modelo (Model Based Predictive Control) generalizado por la sigla MPC, es una estrategia de control que hace uso del modelo del sistema para predecir las salidas futuras y determinar la acción de control optima aplicada en el momento presente. En esta investigación se estudió el control predictivo de potencia en los convertidores.

El control predictivo de potencia directa (PDPC) aplicado en los convertidores de potencia se clasifica en términos de los vectores aplicados, ya sea con vectores de tensión o vectores de flujo virtual. Estos controladores también pueden clasificarse según la teoría de la potencia instantánea empleada, que puede ser Teoría PQ o Teoría PQ extendida.

En este proyecto se estudiaron y analizaron cuatro (4) controladores predictivos de potencia directa definidos en el documento como PDPC, OPDPC, VF-PDPC y OVF-PDPC. Se utilizó un circuito de prueba implementado en Simulink de Matlab, bajo diferentes condiciones de tensión de red: balanceado, desbalanceado, desbalanceado y distorsionado.

Se puede concluir a partir de los resultados de simulación que los tiempos de respuesta de los controladores son mínimos. Esta es una característica del control predictivo, debido a que se minimiza un error futuro.

Los controladores presentaron buen comportamiento en el seguimiento de la referencia de la potencia activa en cada uno de los casos. En el seguimiento de la potencia reactiva el comportamiento fue bueno, con excepción del controlador OVF-PDPC, donde la forma de onda la potencia reactiva presenta un comportamiento oscilatorio en el caso balanceado y no funciona en los casos desbalanceado y desbalanceado-distorsionado.

Los cambios en los valores de referencia de la potencia activa y reactiva producen perturbaciones en las corrientes que el inversor inyecta a la red, las cuales se estabilizan rápidamente en un valor de régimen permanente. La respuesta del controlador no afecta la forma de onda de la corriente, que si es influenciada directamente por las características de la tensión de la red.

Los controladores estudiados presentan un comportamiento eficiente en el control de la potencia activa, pero no en todos los casos de la potencia reactiva. Es conveniente estudiar el modelamiento de la potencia reactiva bajo condiciones no ideales (desbalanceadas y distorsionadas) para ajustar el controlador y mejorar las respuestas.

Capítulo 6. Bibliografía

- [1] Muhammad H. Rashid, Ph.D. Fellow IEEE, Professor of Electrical Engineering, Purdue University at Fort Wayne, “Electrónica de potencia – Circuitos, dispositivos y aplicaciones”, Segunda edición, Traducción: Ing. Gabriel Sánchez García.
- [2] D. Murillo-Yarce, A. Alzate-Gómez, y A. Escobar-Mejía, Análisis comparativo del control predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables. *TecnoLógicas*, vol. 21, no. 41, pp. 45-62, 2018.
- [3] G. Gandi and J. Loncarski, “Simplified implementation of optimised carrier-based PWM in three-level inverters,” In *Electronics Letters*, vol. 50, no. 8, pp. 631-633, 2014.
- [4] D. G. Holmes, “The significance of zero space vector placement for carrier-based PWM schemes,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 5, pp.1122-1129, 1996.
- [5] S. Sanusi, Z. Ibrahim, A. Jidin, M. H. Jopri, K. A. Karim and M. N. Othman, “Implementation of Space Vector Modulation for voltage source inverter,” in *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013 pp. 1361-1366.
- [6] K. Zhou and D. Wang, “Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis three-phase inverters,” *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 186-196, 2002.
- [7] P. A. Bezerra and M. L. Heldwein, “Generation of hybrid carrier-based modulation patterns,” In *Power Electronics Conference (COBEP)*, 2013, pp. 183-188.



- [8] G. O. Jiménez M, “*Armónicos: Calculo de la Potencia Reactiva para la implementación de Bancos de condensadores en Cargas Aisladas*”, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y computación, Programa de Maestría en Ingeniería – Automatización industrial, Manizales, 2008.

- [9] A. Pérez, A. Pérez Hidalgo, E. Pérez Berenguer. “Introducción a los Sistemas de Control y Modelo matemático para Sistemas Lineales invariantes en el tiempo.”, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería, Departamento de Electrónica y Automática, 2008.

- [10] J. Aracil, F. Gómez, Ingeniería Electrónica “*Introducción a Matlab y Simulink*”, Regulación Automática, Curso 2006/2007.